

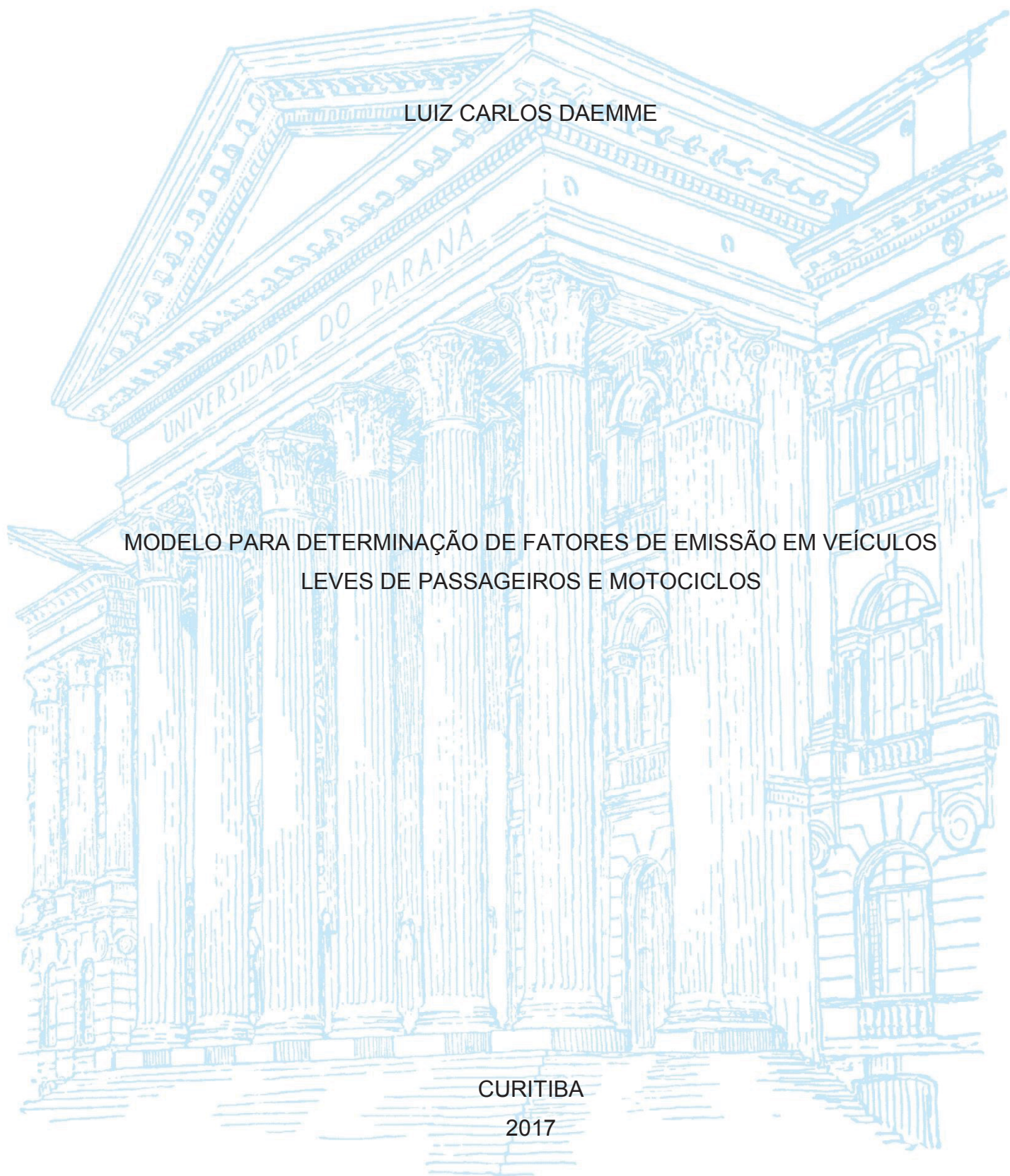
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ CARLOS DAEMME

MODELO PARA DETERMINAÇÃO DE FATORES DE EMISSÃO EM VEÍCULOS  
LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS

CURITIBA

2017



LUIZ CARLOS DAEMME

MODELO PARA DETERMINAÇÃO DE FATORES DE EMISSÃO EM VEÍCULOS  
LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Marcelo Risso Errera, Ph. D.

Coorientador: Prof. Renato Penteado, Dr.

CURITIBA

2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

D123m

Daemme, Luiz Carlos

Modelo para determinação de fatores de emissão em veículos leves de passageiros e motocicletas / Luiz Carlos Daemme. – Curitiba, 2017.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2017.

Orientador: Marcelo Risso Errera – Coorientador: Renato de Arruda Penteado Neto .

1. Veículos a motor – Dispositivos de controle da poluição. 2. Ar – Poluição. 3. Controle de poluição – Equipamentos e acessórios. 4. Política ambiental – Brasil. 5. Degradação ambiental . I. Universidade Federal do Paraná. II. Errera, Marcelo Risso. III. Penteado Neto , Renato de Arruda. IV. Título.

CDD: 628.1686


Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **LUIZ CARLOS DAEMME**, intitulada: "**Modelo para determinação de fatores de emissão em veículos leves de passageiros e motocicletas**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 10 de Novembro de 2017.



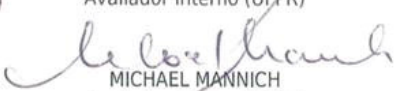
MARCELO RISSO ERRERA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



GEORGE STANESCU  
Avaliador Externo (UFPR)



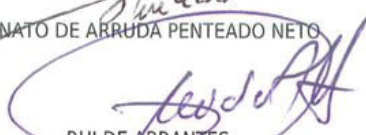
MARCELO RODRIGUES BESSA  
Avaliador Interno (UFPR)



MICHAEL MANNICH  
Avaliador Interno (UFPR)



RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO



RUI DE ABRANTES  
Avaliador Externo (USP)



PEDRO CAFFARO VICENTINI

Dedico à família, base de tudo que somos e criamos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que propiciou a realização de mais esse sonho.

A minha família pelo constante apoio e incentivo. Em especial a minha esposa, Jocieli, e meus filhos: Luiz Gustavo, Maria Luiza, Sara e João Henrique.

Aos meus pais, que não mediram esforços, mesmo perante diversas dificuldades, ao educarem seus filhos e sinalizarem o caminho a ser seguido.

Aos meus orientadores, Professores Marcelo e Renato, sempre disponíveis para ajudar e discutir as possibilidades e os rumos desta pesquisa.

Aos Institutos Lactec, pelo apoio concedido para realização deste projeto, em especial ao Sr. Dennis Rempel, gerente do Laboratório de Emissões Veiculares – LEME.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) pelos ensinamentos e participação na conquista deste objetivo.

A todos os funcionários da UFPR pelo apoio institucional durante esses anos de estudos, em especial ao Celmar, secretário do PPGERHA.

Aos coordenadores do PPGERHA pelo constante empenho para manter a excelência do Programa.

Ao Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello – Cenpes, Petrobras, por propiciar o uso dos dados de ensaios para realização desta pesquisa.

A CAPES e ao CNPq pelo apoio recebido possibilitando a realização desse projeto.

“Ambiente limpo não é o que mais se limpa, e sim o que menos se suja.”  
(Chico Xavier)



## RESUMO

A industrialização proporcionou um desenvolvimento tecnológico e mudanças no comportamento da sociedade. Nas últimas décadas houve um aumento no uso do transporte individual de passageiros, tornando a frota de veículos leves de passageiros e motocicletas um problema nos grandes centros urbanos. O aumento da frota associado à queima de combustíveis contribui para a degradação da qualidade do ar, provocando sérios danos para a saúde e meio ambiente. No Brasil, como em outros países, essa preocupação não é recente. Na década de 1980 planejou-se e implantou-se o programa para o controle e redução das emissões automotivas, o PROCONVE (1986). Posteriormente, em 2003, esse processo foi ampliado aos motocicletas com a criação do PROMOT – programa que tem como premissa a redução gradual dos limites de emissões. Como consequência houve incrementos tecnológicos nos veículos e novas formulações de combustíveis. Paralelamente à redução das emissões veiculares, de acordo com os limites preconizados pela legislação, compostos ainda não legislados têm sido objeto de estudos no Brasil e no exterior, dentre eles o óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e a amônia ( $\text{NH}_3$ ), que têm recebido atenção pela sua contribuição na emissão de gases do efeito estufa e degradação da saúde pública. O foco desses estudos também recai sobre a degradação dos veículos e motores e seu impacto nas emissões. Abordando esse tema, em 2011, o Ministério do Meio Ambiente divulgou o primeiro Inventário Nacional de Emissões Veiculares, documento que apresenta estimativas das emissões da frota brasileira entre 1980 e 2020, proporcionando subsídios para a tomada de decisões dos agentes reguladores. Uma segunda versão foi apresentada em 2013, porém ambos os documentos citam suas limitações, destacando a falta de estudos com informações reais dos fatores de emissão envolvendo a frota circulante. O objetivo deste trabalho é avaliar as emissões de poluentes regulados e não regulados de veículos leves de passageiros e motocicletas da frota circulante brasileira, abastecidos com diferentes combustíveis, para identificar os principais causadores de variabilidade nos fatores de emissão. A análise exploratória está fundamentada em amostras de veículos usados e novos, diferentes composições de combustíveis e ensaios normatizados de laboratório para determinar os efeitos e inter-relações existentes com análise dos resultados através de métodos estatísticos. Os resultados indicam que a metodologia adotada pelo inventário nacional de emissões veiculares, tanto para veículos leves como para motocicletas, subestima as emissões de alguns compostos ( $\text{CO}$ , NMHC,  $\text{NO}_x$  e RCHO) e superestima outros ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ). Apresentam-se os fatores de emissão obtidos e comparados com os do inventário nacional e os resultados demonstram também que a deterioração da combustão e do controle de emissões pode ser representada pelo fator ano de uso e pela correspondente fase tecnológica dos veículos. Essa informação permite realizar projeções de emissões de frota, de forma direta, a partir dos anos de uso dos veículos da frota.

Palavras chave: Emissões veiculares. Inventário de emissões. Fatores de emissão.

Degradação.



## ABSTRACT

The period of industrialization provided technological development and changes in the behavior of society. In recent decades there has been an increase in the use of individual passenger transport, therefore light passenger vehicles and motorcycles represent a problem in large urban centers. The increase in the vehicle fleet associated with the use of fuels contributes to the degradation of air quality causing serious harm to public health and to the environment. In Brazil, as well as in other countries, this concern is not recent. In the 1980s, the PROCONVE Program for the Control and Reduction of Automotive Emissions was planned and implemented. Later, in 2003, this process was extended to motorcycles with the creation of PROMOT. The program creates gradual restrictive emission limits for new motor vehicles. The focus of these studies is also on the degradation of vehicles and engines and their impact on emissions. Addressing this issue, in 2011, the Ministry of the Environment released the first National Inventory of Vehicle Emissions, document that presents estimates of the emissions of the Brazilian fleet between 1980 and 2020, providing subsidies for the decision-making of regulatory agents. As a consequence, there were technological increases in vehicles, and new fuel formulations. Parallel to the reduction of vehicular emissions according to the limits recommended by the legislation, other compounds not yet legislated have been studied in Brazil and abroad. Among these compounds, nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and ammonia (NH<sub>3</sub>) have received attention for their contribution in the emission of greenhouse gases and degradation of public health. An important focus of these studies is devoted to the degradation of vehicles and engines, and its impact on emissions. Addressing this issue, in 2011, the Ministry of the Environment released the first National Inventory of Vehicle Emissions. The document estimates the emissions of the Brazilian fleet between 1980 and 2020. A second version was presented in 2013. The inventory is an important tool to estimate the emissions, providing subsidies for the decision-making of the regulators. However, both documents cite their limitations, highlighting the lack of studies with real information on the emission factors involving the circulating fleet. The objective of this work was to evaluate the emission factors of regulated and unregulated pollutants of light passenger's vehicles and motorcycles of the Brazilian circulating fleet, supplied with different fuels, to identify the main causes of variability in emission factors. The exploratory analysis is based on samples of used and new vehicles, different fuel compositions and standardized laboratory tests to determine the effects and existing interrelationships with the analysis of the results through statistical methods. The results indicate that the methodology adopted by the National Inventory of Vehicle Emissions for both light vehicles and motorcycles underestimates some compound emissions (CO, NMHC, NO<sub>x</sub>, RCHO), and overestimates others (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O). In this work, the emission factors obtained and compared with those of the National Inventory are presented. The results also revealed that the deterioration of the combustion and the deterioration of the emissions control can be represented by the year factor of use and the corresponding technological phase of the vehicles. This information makes it possible to predict fleet emissions in a direct way with the years of use of fleet vehicles.

Keywords: Vehicle emissions. Emissions inventory. Emissions factors. Degradation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	36
FIGURA 2 – LIMITES DE EMISSÕES - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS....	39
FIGURA 3 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE HC, CO E NO <sub>x</sub> .....	44
FIGURA 4 – TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DIESEL.....	46
FIGURA 5 – PROCESSO DE REDUÇÃO DE NO <sub>x</sub> EM CATALISADOR LNT .....	47
FIGURA 6 – ATUAÇÃO DO FILTRO DE PARTICULAS NO MP .....	49
FIGURA 7 – ESTIMATIVA DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES EM 2011.....	73
FIGURA 8 – MATRIZ DE AMOSTRAS EM VEÍCULOS LEVES.....	75
FIGURA 9 – MATRIZ DE AMOSTRAS EM MOTOCICLOS .....	76
FIGURA 10 – MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS.....	77
FIGURA 11 – APLICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS NAS AMOSTRAS .....	78
FIGURA 12 – FATORES DE ENTRADA E RESPOSTAS DO SISTEMA.....	80
FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE COMBUSTÍVEL E ANÁLISES REALIZADAS .....	81
FIGURA 14 – MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS E AMOSTRAS .....	83
FIGURA 15 – FLUXO DAS AMOSTRAS NO PROGRAMA DE TESTES.....	85
FIGURA 16 – CICLO DE CONDUÇÃO EM VEÍCULOS LEVES .....	87
FIGURA 17 – LAYOUT SALA DE ENSAIOS EM VEÍCULOS LEVES.....	89
FIGURA 18 – CICLO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL ESTRADA.....	90
FIGURA 19 – CICLO ELEMENTAR - ENSAIO EM MOTOCICLOS .....	91
FIGURA 20 – CICLO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES EM MOTOCICLOS .....	92
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO DO CICLO WMTc .....	93
FIGURA 22 – SALA DE ENSAIOS EM MOTOCICLOS .....	94
FIGURA 23 – MOTOCICLO PREPARADO PARA ENSAIO DE EMISSÕES .....	95
FIGURA 24 – PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO ABSORVENTE .....	96
FIGURA 25 – ESQUEMA DA COLETA DE ALDEÍDOS.....	96
FIGURA 26 – CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS COM USO DO FTIR.....	99
FIGURA 27 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS....	110
FIGURA 28 – CARGA DOS COMPONENTES PRINCIPAIS .....	112
FIGURA 29 – EMISSÃO DE NO <sub>x</sub> E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	113
FIGURA 30 – EMISSÃO DE ACORDO COM ANOS DE USO.....	115
FIGURA 31 – CURVAS DE SUCATEAMENTO - VEÍCULOS CICLO OTTO .....	116

FIGURA 32 – EMISSÕES E AJUSTE DOS DADOS - FASE M3 FABRICADOS EM 2009.....	119
FIGURA 33 – EMISSÃO DE CO E INCERTEZA EM RELAÇÃO AOS ANOS DE USO .....	120
FIGURA 34 – EMISSÕES E AJUSTE DOS DADOS - MOTOCICLOS <i>FLEX</i> COM USO DE ETANOL.....	121
FIGURA 35 – EMISSÕES DE THC E AJUSTE DE DADOS - ANO DE FABRICAÇÃO DE 2009.....	122
FIGURA 36 – EMISSÕES DE THC COM ACÚMULO DE QUILOMETRAGEM (A) E REGRESSÃO DE DADOS (B) COM USO DE ETANOL HIDRATADO...	123
FIGURA 37 – EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> E AJUSTE DE DADOS - ANO DE FABRICAÇÃO 2009 COM USO DE GASOLINA E EHR.....	125
FIGURA 38 – EMISSÕES DE CO E AJUSTE DE DADOS PARA MOTOCICLOS DA FASE M2.....	126
FIGURA 39 – EMISSÕES DE THC E AJUSTE DE DADOS PARA FASE M2 .....	127
FIGURA 40 – EMISSÕES DE CO E AJUSTE DE DADOS PARA MOTOCICLOS DA FASE M1 .....	129
FIGURA 41 – EMISSÕES DE THC E AJUSTE DE DADOS PARA FASE M1 .....	130
FIGURA 42 – EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> E AJUSTE DE DADOS PARA FASE M1.....	131
FIGURA 43 – RELAÇÃO NMHC/THC EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO .....	133
FIGURA 44 – RELAÇÃO NMHC/THC USANDO OS CICLOS DE ENSAIO EURO E WMTC .....	134
FIGURA 45 – RELAÇÃO ENTRE NMHC E THC COM DIFERENTES TEORES DE ETANOL EM MOTOCICLOS A GASOLINA.....	135
FIGURA 46 – RELAÇÃO NMHC/THC EM DIFERENTES MOTOCICLOS.....	136
FIGURA 47 – RELAÇÃO ENTRE CH <sub>4</sub> E EMISSÕES DE NMHC E THC COM USO DE GASOLINA .....	138
FIGURA 48 – RELAÇÃO ENTRE CH <sub>4</sub> MEDIDO E ESTIMADO .....	139
FIGURA 49 – EMISSÃO DE ALDEÍDOS TOTAIS EM MOTOCICLOS E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.....	140
FIGURA 50 – CORRELAÇÃO ENTRE ALDEÍDOS TOTAIS E THC, CO, NO <sub>x</sub> E CH <sub>4</sub> .....	141
FIGURA 51 – CORRELAÇÃO ENTRE ALDEÍDOS TOTAIS E THC - BASE LOG..	141

FIGURA 52 – CORRELAÇÃO ENTRE ALDEÍDOS TOTAIS E THC COM USO DE EHR.....	143
FIGURA 53 – EMISSÃO DE NH <sub>3</sub> - AMOSTRAS DAS FASES PP, M1 E M2.....	145
FIGURA 54 – EMISSÕES COM USO DE CATALISADORES EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE ENVELHECIMENTO .....	148
FIGURA 55 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA AS EMISSÕES REGULAMENTADAS, NH <sub>3</sub> E N <sub>2</sub> O .....	149
FIGURA 56 – EMISSÃO DE NH <sub>3</sub> EM MOTOCICLOS DAS FASES M3 E M4 .....	150
FIGURA 57 – EMISSÃO DE NH <sub>3</sub> EM MOTOCICLOS M3 E M4 <i>FLEX FUEL</i> COM USO DE ETANOL HIDRATADO DE REFERÊNCIA.....	151
FIGURA 58 – EMISSÃO DE N <sub>2</sub> O - MOTOCICLOS DAS FASES PP, M1 E M2.....	152
FIGURA 59 – EMISSÃO DE N <sub>2</sub> O EM MOTOCICLOS DAS FASES M3 E M4 .....	153
FIGURA 60 – EMISSÃO DE N <sub>2</sub> O EM MOTOCICLOS M3 E M4 <i>FLEX FUEL</i> COM USO DE ETANOL.....	154
FIGURA 61 – FATORES DE EMISSÃO DE CO PARA VEÍCULOS FABRICADOS EM 1980.....	157
FIGURA 62 – FATORES DE EMISSÃO PARA O NO <sub>x</sub> POR ACÚMULO DE QUILOMETRAGEM (A) E AJUSTE DO MODELO PROPOSTO (B).....	158
FIGURA 63 – LIMITES DE EMISSÃO DE CO, EMISSÕES CERTIFICADAS E PRÉ CATALISADOR POR FASES DO PROCONVE .....	159
FIGURA 64 – FATOR DE EMISSÃO PARA O CO EM VEÍCULOS LEVES DA FASE L3 ANO DE FABRICAÇÃO 1998 .....	161
FIGURA 65 – FATOR DE EMISSÃO EM VEÍCULOS <i>FLEX FUEL</i> DA FASE L5 ANO DE FABRICAÇÃO 2010, COM USO DE GASOLINA.....	163
FIGURA 66 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES PP, L1, L2, L3 E L4, USANDO ETANOL .....	164
FIGURA 67 – EMISSÕES DE AMÔNIA EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS COM USO DE ETANOL E GASOLINA .....	166
FIGURA 68 – EMISSÕES DE N <sub>2</sub> O EM VEÍCULOS LEVES COM USO DE ETANOL E GASOLINA .....	167
FIGURA 69 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS EM MOTOCICLOS (A) E TESTE DE TUKEY (B).....	170
FIGURA 70 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS – MOTOCICLOS M3 E M4 (A) E TESTE DE TUKEY (B).....	171

FIGURA 71 – FATOR COMPARATIVO MÉDIO EM MOTOCICLOS .....	173
FIGURA 72 – FATOR COMPARATIVO MÉDIO EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	173
FIGURA 73 – COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO ENTRE FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS E IEV - MOTOCICLOS FABRICADOS EM 2009 ....	176
FIGURA 74 – COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO ENTRE FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS E DO IEV PARA MOTOCICLOS <i>FLEX FUEL</i> .....	177
FIGURA 75 – EMISSÕES DE CO ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B) EM MOTOCICLOS ....	178
FIGURA 76 — ESTIMATIVAS DE COMPOSIÇÃO DA FROTA E DAS EMISSÕES DE CO PARA O ANO DE 2015 - MODELOS DO IEV E TESE ....	179
FIGURA 77 – ESTIMATIVAS DE COMPOSIÇÃO DA FROTA E DAS EMISSÕES DE CO PARA O ANO DE 2020 - MODELOS DO IEV E TESE ....	180
FIGURA 78 — COMPARATIVO DA EMISSÃO DE THC ( $\text{g Km}^{-1}$ ) ENTRE FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS E DO IEV .....	181
FIGURA 79 – EMISSÕES DE THC ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B) EM MOTOCICLOS ....	182
FIGURA 80 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES ACUMULADAS DE THC ENTRE 1980 E 2020 EM MOTOCICLOS POR FASES DO PROMOT .....	183
FIGURA 81 – COMPARATIVO DA FROTA, Km ACUMULADOS E EMISSÕES PARA OS ANOS DE 2015 E 2020 .....	184
FIGURA 82 – EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B) .....	185
FIGURA 83 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE NMHC ENTRE 1980 E 2020 UTILIZANDO FATORES DE EMISSÃO DO IEV .....	186
FIGURA 84 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE NMHC ENTRE 1980 E 2020 UTILIZANDO FATORES DE EMISSÃO DO MODELO PROPOSTO .....	187
FIGURA 85 – ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES DE NMHC PARA OS ANOS DE 2015 E 2020 USANDO DADOS DO IEV E TESE .....	187
FIGURA 86 – EMISSÕES DE CH <sub>4</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B) .....	189
FIGURA 87 – EMISSÕES DE THC E RCHO ( $\text{g Km}^{-1}$ ) ENTRE USO DE GASOLINA E ETANOL PARA MOTOCICLOS FABRICADOS EM 2009 .....	190

FIGURA 88 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE ALDEÍDOS TOTAIS ENTRE 1980 E 2020 .....	191
FIGURA 89 – EMISSÕES DE ALDEÍDOS TOTAIS EM MOTOCICLOS <i>FLEX FUEL</i> COM USO DE ETANOL E GASOLINA ENTRE 2009 E 2020 .....	192
FIGURA 90 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE AMÔNIA ENTRE 1980 E 2020 PARA MOTOCICLOS .....	193
FIGURA 91 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE AMÔNIA NA FROTA <i>FLEX FUEL</i> .....	193
FIGURA 92 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE N <sub>2</sub> O ENTRE 1980 E 2020 UTILIZANDO FATORES DE EMISSÃO DO IEV .....	195
FIGURA 93 – EMISSÕES ACUMULADAS DE N <sub>2</sub> O ATÉ 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV E TESE .....	196
FIGURA 94 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) .....	197
FIGURA 95 – EMISSÕES DE NMHC ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	198
FIGURA 96 – EMISSÕES DE THC, NMHC E CH <sub>4</sub> PARA 2015 E 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV E TESE .....	199
FIGURA 97 – EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	200
FIGURA 98 – DIFERENÇAS ENTRE O MODELO PROPOSTO E O IEV – PERÍODO 1980 A 2020 .....	201
FIGURA 99 – EMISSÕES DE ALDEÍDOS DE 1980 A 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	202
FIGURA 100 – EMISSÕES DE N <sub>2</sub> O DE 1980 A 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV (A) E TESE (B) PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	203
FIGURA 101 – EMISSÕES DE NH <sub>3</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	204
FIGURA 102 – EMISSÕES DE NH <sub>3</sub> ENTRE 1980 E 2020 DE ACORDO COM COMBUSTÍVEIS USADOS E TIPO DA FROTA .....	205
FIGURA 103 – EMISSÕES DE CO DE 1980 A 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV (A) E TESE (B) - VEÍCULOS E MOTOCICLOS .....	206
FIGURA 104 – EMISSÕES DE NMHC DE 1980 A 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV (A) E TESE (B) - VEÍCULOS E MOTOCICLOS .....	207



FIGURA 105 – EMISSÕES THC, NMHC E CH <sub>4</sub> EM 2015 E 2020 COM PROJEÇÕES DO IEV E TESE - VEÍCULOS E MOTOCICLOS.....	208
FIGURA 106 – EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> DE 1980 A 2020 COM PROJEÇÕES DO IEV E TESE - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS.....	209
FIGURA 107 – EMISSÕES DE ALDEÍDOS DE 1980 A 2020 COM PROJEÇÕES DO IEV E TESE - VEÍCULOS E MOTOCICLOS.....	210
FIGURA 108 – EMISSÕES DE NH <sub>3</sub> DE 1980 A 2020 COM FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS PARA VEÍCULOS E MOTOCICLOS.....	211
FIGURA 109 – TEOR DE ENXOFRE NO ÓLEO DIESEL – BASE JUNHO DE 2015.....	262
FIGURA 110 – TEOR DE ENXOFRE NA GASOLINA – BASE ABRIL DE 2015.....	262
FIGURA 111 – EVOLUÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE NA GASOLINA BRASILEIRA ENTRE 1979 E 2015.....	263
FIGURA 112 – TEOR MÉDIO DE ENXOFRE NA GASOLINA BRASILEIRA ENTRE 2008 E 2013.....	263
FIGURA 113 – REGULAMENTAÇÃO DAS EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	264
FIGURA 114 – ESTIMATIVAS DA PORCENTAGEM DE USO DA FROTA <i>FLEX FUEL</i> COM GASOLINA E ETANOL HIDRATADO.....	275
FIGURA 115 – VENDAS E PROJEÇÃO DE VENDAS DE MOTOCICLOS (A); FROTA ESTIMADA E PROJEÇÃO DA FROTA DE MOTOCICLOS (B).....	276
FIGURA 116 – VENDAS E PROJEÇÃO DE VENDAS PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS.....	277
FIGURA 117 – RELAÇÃO ENTRE NMHC E THC COM DIFERENTES TEORES DE ETANOL EM MOTOCICLO <i>FLEX FUEL</i> .....	301
FIGURA 118 – RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC COM TEORES DE ETANOL ENTRE 25% E 100% .....	302
FIGURA 119 – RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC COM TEORES DE ETANOL ENTRE 25 E 100%.....	302
FIGURA 120 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC/NMHC E THC/NMHC-ANQ .....	303
FIGURA 121 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES L5 E L6, USANDO ETANOL .....	305

FIGURA 122 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES PP, L1, L2, L3 E L4, USANDO GASOLINA A22 .....	305
FIGURA 123 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES L5 E L6, USANDO GASOLINA A22 .....	306
FIGURA 124 – EMISSÃO DE N <sub>2</sub> O EM MOTOCICLO COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA DE PÓS-TRATAMENTO .....	308
FIGURA 125 – EMISSÃO DE N <sub>2</sub> O - VEÍCULO LEVE DE PASSAGEIROS DA FASE L3 COM GASOLINA A22-S50 .....	309
FIGURA 126 – EMISSÃO DE N <sub>2</sub> O - VEÍCULO LEVE DE PASSAGEIROS DA FASE L6 COM GASOLINA A22-S50 .....	309
FIGURA 127 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE THC COM USO DE DIFERENTES GASOLINAS (A) E TESTE DE TUKEY (B).....	310
FIGURA 128 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE THC COM DIFERENTES GASOLINAS - MOTOCICLOS M3 E M4 (A) E TESTE DE TUKEY (B).....	311
FIGURA 129 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS - MOTOCICLOS PP, M1 E M2 (A) E TESTE DE TUKEY (B).....	311
FIGURA 130 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS - MOTOCICLOS M3 E M4 (A) E TESTE DE TUKEY (B).....	312
FIGURA 131 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS E TEORES DE ETANOL - MOTOCICLOS <i>FLEX FUEL</i> .....	313
FIGURA 132 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE THC COM DIFERENTES GASOLINAS E TEORES DE ETANOL - MOTOCICLOS <i>FLEX FUEL</i> .....	313
FIGURA 133 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS E TEORES DE ETANOL - MOTOCICLOS <i>FLEX FUEL</i> .....	314
FIGURA 134 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	315
FIGURA 135 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	315
FIGURA 136 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS <i>FLEX FUEL</i> (A) TESTE DE TUKEY (B) .....	316
FIGURA 137 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	316
FIGURA 138 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS (A) TESTE DE TUKEY (B).....	317

FIGURA 139 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS (A) TESTE DE TUKEY (B).....	318
FIGURA 140 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC EM VEÍCULOS FLEX (A) TESTE DE TUKEY (B) .....	318
FIGURA 141 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC EM VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	319
FIGURA 142 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	319
FIGURA 143 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	320
FIGURA 144 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS FLEX (A) TESTE DE TUKEY (B) .....	321
FIGURA 145 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B).....	321

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – POLUENTES DO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES .....	65
TABELA 2 – PRIMEIRA FASE DO PROGRAMA <i>AUTO OIL</i> NOS EUA .....	67
TABELA 3 – PRINCIPAIS RESULTADOS DO PROGRAMA EPEFE .....	69
TABELA 4 – RESULTADOS DO PROGRAMA <i>AUTO OIL</i> MEXICANO .....	70
TABELA 5 – METODOLOGIAS DE ENSAIOS E ANÁLISES .....	72
TABELA 6 – DISTRIBUIÇÃO DA FROTA E AMOSTRAS NAS FASES DO PROCONVE.....	74
TABELA 7 – DISTRIBUIÇÃO DA FROTA E AMOSTRAS NAS FASES DO PROMOT .....	75
TABELA 8 – COMBINAÇÃO DE FATORES $F_1$ , $F_2$ E $F_3$ EM VEÍCULO ETANOL .....	80
TABELA 9 – DADOS DOS GASES DE REFERÊNCIA E LEITURAS COMPARATIVAS NO FTIR .....	100
TABELA 10 – DADOS DE AUTOVALOR E PORCENTAGEM DE VARIÂNCIA DOS COMPONENTES .....	111
TABELA 11 – EMISSÃO DE CO ( $\text{g Km}^{-1}$ ) EM MOTOCICLOS NOVOS POR ANO DE FABRICAÇÃO .....	114
TABELA 12 – EMISSÃO DE CO ( $\text{g Km}^{-1}$ ) ANTES DO CATALISADOR E COM SIMULAÇÃO DE FALHA.....	114
TABELA 13 – EMISSÃO DE THC ( $\text{g Km}^{-1}$ ) ANTES DO CATALISADOR E COM SIMULAÇÃO DE FALHA.....	122
TABELA 14 – EMISSÃO DE NO <sub>x</sub> ( $\text{g Km}^{-1}$ ) ANTES DO CATALISADOR E COM SIMULAÇÃO DE FALHA.....	124
TABELA 15 – EMISSÃO DE NO <sub>x</sub> ( $\text{g Km}^{-1}$ ) EM MOTOCICLOS NOVOS DA FASE M2 POR ANO DE FABRICAÇÃO .....	127
TABELA 16 – FATOR DE EMISSÃO ESTIMADO PARA O NO <sub>x</sub> ( $\text{g Km}^{-1}$ ) EM MOTOCICLOS DA FASE M2 POR ANO DE FABRICAÇÃO .....	128
TABELA 17 – FATORES DE EMISSÃO PARA MOTOCICLOS FABRICADOS ANTES DE 2003 .....	131
TABELA 18 – FATORES DE EMISSÃO PARA MOTOCICLOS FABRICADOS ANTES DE 2003 .....	132
TABELA 19 – COMPARATIVO DE VALORES MEDIDOS E ESTIMADOS DE ALDEÍDOS TOTAIS .....	143

TABELA 20 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE EMISSÃO DE NH <sub>3</sub> E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS .....	145
TABELA 21 – FATORES DE CONVERSÃO PARA ESTIMAR VEÍCULOS ALTO EMISSORES DAS FASES PP E L1 .....	156
TABELA 22 – FATOR CALCULADO UTILIZADO PARA CÁLCULO DA DEGRADAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DAS FASES L5 E L6 .....	162
TABELA 23 – DADOS DA REGRESSÃO PARA ESTIMATIVAS DA EMISSÃO DE NMHC A PARTIR DAS EMISSÕES DE THC.....	164
TABELA 24 – EMISSÕES MÉDIAS DE NH <sub>3</sub> COM USO DE GASOLINA E ETANOL - VEÍCULOS LEVES POR FASE DO PROCONVE .....	166
TABELA 25 – EMISSÕES MÉDIAS DE N <sub>2</sub> O COM USO DE GASOLINA E ETANOL - VEÍCULOS LEVES POR FASE DO PROCONVE .....	167
TABELA 26 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS DO CICLO OTTO NOVOS DA FASE L1 .....	253
TABELA 27 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS NOVOS DA FASE L2 .....	254
TABELA 28 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L3.....	254
TABELA 29 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L4.....	255
TABELA 30 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L5.....	256
TABELA 31 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L6.....	257
TABELA 32 – LIMITES DE EMISSÃO PARA AS FASES P-1 A P-4.....	258
TABELA 33 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS PESADOS, FASES P- 5, P-6 E P-7.....	259
TABELA 34 – LIMITES DE EMISSÃO PARA CICLOMOTORES, MOTOCICLOS E SIMILARES.....	260
TABELA 35 – LIMITES DE EMISSÃO PARA CICLOMOTORES, MOTOCICLOS E SIMILARES.....	261
TABELA 36 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	264

TABELA 37 – FROTA DE VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS POR ANO.....	278
TABELA 38 – EMISSÕES EM MOTOCICLOS POR AMOSTRAS, VALORES MÉDIOS E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	279
TABELA 39 – EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES COM USO DE GASOLINA.....	280
TABELA 40 – EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES COM USO DE ETANOL.....	281
TABELA 41 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO .....	282
TABELA 42 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC .....	283
TABELA 43 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> .....	284
TABELA 44 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> - VEÍCULOS MOVIDOS A GASOLINA .....	285
TABELA 45 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> - VEÍCULOS FLEX FUEL GASOLINA .....	286
TABELA 46 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> - VEÍCULOS DEDICADOS A ETANOL.....	287
TABELA 47 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO <sub>x</sub> - VEÍCULOS FLEX FUEL ETANOL .....	288
TABELA 48 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS GASOLINA.....	289
TABELA 49 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS FLEX FUEL GASOLINA.....	290
TABELA 50 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS DEDICADOS A ETANOL .....	291
TABELA 51 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS FLEX FUEL ETANOL .....	292
TABELA 52 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS GASOLINA .....	293
TABELA 53 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS FLEX GASOLINA .....	294
TABELA 54 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS ETANOL .....	295



TABELA 55 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS FLEX FUEL ETANOL .....	296
TABELA 56 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS - VEÍCULOS GASOLINA .....	297
TABELA 57 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS – VEÍCULOS FLEX FUEL GASOLINA .....	298
TABELA 58 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS – VEÍCULOS ETANOL .....	299
TABELA 59 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS – VEÍCULOS FLEX ETANOL .....	300
TABELA 60 – DADOS DAS REGRESSÕES ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC COM DIFERENTES TEORES DE ETANOL .....	303
TABELA 61 – COMPARATIVO DE VALORES MEDIDOS E ESTIMADOS DE NMHC E CH <sub>4</sub> UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE REGRESSÃO PROPOSTA.....	304
TABELA 62 – VALORES ESTIMADOS DE INTENSIDADE DE USO DA FROTA, EM Km ANO <sup>-1</sup> .....	322
TABELA 63 – FATORES DE CORREÇÃO DA INTENSIDADE DE USO DA FROTA DE ACORDO COM VENDAS DE COMBUSTÍVEIS .....	323
TABELA 64 – ESTIMATIVA DO USO DE GASOLINA E ETANOL EM VEÍCULOS <i>FLEX FUEL</i> .....	324

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACN	- Acetonitrila
AEA	- Associação Brasileira de Engenharia Automotiva
ANQ	- Álcool não queimado
ARLA	- Agente redutor líquido
AVC	- Amostrador de volume constante
CARB	- Conselho da Califórnia para os recursos do ar
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFR	- Código de regulamentos federais (Estados Unidos da América)
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	- Composto orgânico volátil
DNPH	- 2,4 dinitrofenil-hidrazina
DPF	- Filtro de partículas para veículos diesel
EGR	- Sistema para recirculação dos gases de exaustão
EPA	- Agência de proteção ambiental americana
ETBE	- Éter etil terc-butilico
EUA	- Estados Unidos da América
FID	- Detector de ionização de chama
FTIR	- Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier
FTP	- Procedimento federal de testes (Estados Unidos da América)
GC	- Cromatografia em fase gasosa
GNV	- Gás natural veicular
HC	- Hidrocarbonetos
HPA	- Hidrocarbonetos aromáticos polinucleares
HPLC	- Cromatografia líquida de alta eficiência
HWFET	- Ciclo estrada de economia de combustível

IEV	- Inventário de emissões veiculares
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IV	- Infravermelho
M1	- Fase 1 do PROMOT
M2	- Fase 2 do PROMOT
M3	- Fase 3 do PROMOT
MCI	- Motor de combustão interna
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MP	- Material particulado
MP <sub>2,5</sub>	- Material particulado com tamanho menor que 2,5µm
NBR	- Norma brasileira
NDIR	- Infravermelho não dispersivo
NEDC	- Novo Ciclo de Condução Europeu
NMHC	- Hidrocarbonetos do tipo não metano
NMOG	- Gases orgânicos do tipo não metano
PAN	- Nitrato de peroxiacetila
ppb	- Partes por bilhão
ppmC	- Partes por milhão de Carbono em base C1
ppmv	- Partes por milhão em volume
PROCONVE	- Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	- Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
RON	- Índice de octano
RPM	- Rotações por minuto
SCR	- Catalisador seletivo de redução
SHED	- Câmara selada para determinação de emissões veiculares

evaporativas

SISNAMA	-	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SQR	-	Somatório dos quadrados dos resíduos
THC	-	Total de Hidrocarbonetos
TWC	-	Catalisador de três vias
UNECE	-	Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa
UV	-	Ultravioleta
UV-Vis	-	Ultravioleta visível
WGS	-	<i>Water-gas-shift</i> (reação de troca água-gás)
WMTC	-	Procedimento harmonizado para ensaio de emissões em motocicletas

## LISTA DE SÍMBOLOS

C	-	Carbono
cc	-	Centímetro cúbico
CeO <sub>2</sub>	-	Óxido de cério
CH <sub>4</sub>	-	Metano
CO	-	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	-	Dióxido de carbono
g km <sup>-1</sup>	-	Gramas por quilômetro
H	-	Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	-	Água
Hz	-	Hertz – unidade de frequência
N <sub>2</sub>	-	Nitrogênio
N <sub>2</sub> O	-	Óxido nitroso
NH <sub>3</sub>	-	Amônia
nm	-	Nanômetro
NO	-	Óxido nítrico
NO <sub>x</sub>	-	Óxidos de nitrogênio
O <sub>2</sub>	-	Oxigênio
O <sub>3</sub>	-	Ozônio
OH	-	Hidroxila

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>28</b>
1.1 OBJETIVOS .....	31
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	33
1.3 DESENVOLVIMENTO DA TESE .....	34
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>37</b>
2.2 FORMAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES .....	41
2.3 TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS E COMBUSTÍVEIS .....	44
2.4 ENSAIOS DE EMISSÃO VEICULAR .....	54
2.5 EMISSÕES NÃO REGULAMENTADAS .....	59
2.6 INVENTÁRIOS DE EMISSÃO .....	63
2.7 PESQUISAS DE EMISSÕES VEICULARES EM FROTAS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE COMBUSTÍVEIS.....	66
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>72</b>
3.1 DELINEAMENTO DE ENSAIOS .....	72
3.2 MÉTODO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES EM VEÍCULOS .....	86
3.3 MÉTODO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES EM MOTOCICLOS .....	90
3.4 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DAS EMISSÕES DE ALDEÍDOS .....	95
3.5 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DE ÁLCOOL NÃO QUEIMADO .....	98
3.6 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DAS EMISSÕES NÃO REGULAMENTADAS.....	98
3.7 TRATAMENTO DOS DADOS .....	104
3.8 MÉTODO PARA ESTIMAR OS FATORES DE EMISSÃO .....	104
3.9 CENARIZAÇÃO .....	107
3.10 CALIBRAÇÕES E VERIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DURANTE O PROGRAMA DE ENSAIOS.....	107
<b>4 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÕES.....</b>	<b>109</b>
4.1 RESULTADOS EM MOTOCICLOS.....	109
4.1.1 Determinação dos Fatores de Emissão.....	109
4.1.1.1 Motociclos pertencentes às fases M3 e M4.....	113
4.1.1.2 Motociclos da fase M2.....	125
4.1.1.3 Motociclos da fase M1.....	128
4.1.1.4 Motociclos fabricados antes da vigência do PROMOT.....	131



4.1.1.5 Determinação do Fator de emissão para o NMHC.....	132
4.1.1.6 Determinação do Fator de emissão para o CH <sub>4</sub> .....	137
4.1.1.7 Determinação do Fator de emissão para Aldeídos .....	139
4.1.1.8 Determinação do Fator de emissão para o NH <sub>3</sub> .....	144
4.1.1.9 Determinação do Fator de emissão para o N <sub>2</sub> O.....	151
4.2 RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DO CICLO OTTO .....	154
4.2.1 Apresentação de Resultados .....	154
4.2.1.1 Determinação dos fatores de emissões .....	154
<b>5 COMPARATIVO ENTRE COMBUSTÍVEIS .....</b>	<b>169</b>
5.1 PADRONIZAÇÃO DOS RESULTADOS.....	169
5.2 SÍNTESE DO COMPARATIVO ENTRE COMBUSTÍVEIS .....	171
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE CENÁRIOS .....</b>	<b>175</b>
6.1 RESULTADOS EM MOTOCICLOS.....	175
6.1.1 Emissões de Monóxido de Carbono - CO .....	175
6.1.2 Emissões de Hidrocarbonetos Totais – THC.....	180
6.1.3 Emissões de Óxidos de Nitrogênio - NO <sub>x</sub> .....	183
6.1.4 Emissões de Hidrocarbonetos do Tipo Não Metano - NMHC .....	185
6.1.5 Emissões de Metano - CH <sub>4</sub> .....	187
6.1.6 Emissões de Aldeídos Totais - RCHO.....	189
6.1.7 Emissões de Amônia – NH <sub>3</sub> .....	192
6.1.8 Emissões de Óxido Nitroso – N <sub>2</sub> O.....	194
6.2 RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS .....	196
6.2.1 Emissões de Monóxido de Carbono.....	196
6.2.2 Emissões de NMHC e CH <sub>4</sub> .....	197
6.2.3 Emissões de NO <sub>x</sub> .....	199
6.2.4 Emissões de Aldeídos .....	201
6.2.5 Emissões de N <sub>2</sub> O .....	202
6.2.6 Emissões de Amônia.....	203
6.3 RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS .....	205
6.3.1 Emissões de Monóxido de Carbono.....	205
6.3.2 Emissões de Hidrocarbonetos.....	206
6.3.3 Emissões de NO <sub>x</sub> .....	208
6.3.4 Emissões de Aldeídos .....	209

6.3.5 Emissões de Amônia.....	211
6.4 SINTESE DOS CENÁRIOS APRESENTADOS .....	211
6.4.1 Motociclos .....	211
6.4.2 Veículos Leves de Passageiros .....	213
6.4.3 Cenários da Frota de Veículos Leves de Passageiros e Motociclos .....	213
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>215</b>
7.1 RECOMENDAÇÕES .....	217
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>219</b>
<b>APÊNDICE 1 – DETALHAMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO POR VEÍCULOS AUTOMORES NO BRASIL .....</b>	<b>253</b>
<b>APÊNDICE 2 – TEOR DE ENXOFRE NOS COMBUSTÍVEIS.....</b>	<b>262</b>
<b>APÊNDICE 3 – CENÁRIO GLOBAL DE REGULAMENTAÇÃO DAS EMISSIONES VEICULARES .....</b>	<b>264</b>
<b>APÊNDICE 4 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE EMISSIONES .....</b>	<b>265</b>
<b>APÊNDICE 5 – CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NO PLANO DE ENSAIOS.....</b>	<b>273</b>
<b>APÊNDICE 6 – PARÂMETROS ADOTADOS PARA CÁLCULO DAS EMISSIONES ENTRE 1980 E 2020 .....</b>	<b>275</b>
<b>APÊNDICE 7 – EMISSIONES POR CLASSE DAS AMOSTRAS.....</b>	<b>279</b>
<b>APÊNDICE 8 – EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EMISSIONES.....</b>	<b>282</b>
<b>APÊNDICE 9 – REGRESSÕES PARA CORRELAÇÃO ENTRE EMISSIONES DE THC E NMHC .....</b>	<b>301</b>
<b>APÊNDICE 10 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE EMISSIONES DE N<sub>2</sub>O EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS DA FASE L3 .....</b>	<b>307</b>
<b>APÊNDICE 11 – COMPARATIVOS ENTRE COMBUSTÍVEIS .....</b>	<b>310</b>
<b>ANEXO 1 – INFORMAÇÕES DO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSIONES .....</b>	<b>322</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental é uma constante nas últimas décadas (AGARWAL, 2007) e o ar limpo é essencial para a saúde humana e para o meio ambiente (LAVE; SESKIN, 1970; KAMPA; CASTANAS, 2008). Porém, desde a revolução industrial, período de grandes inovações tecnológicas e uso intensivo de combustíveis fósseis, a qualidade do ar vem se deteriorando, com destaque para os grandes centros urbanos, principalmente como resultado das atividades humanas (FENGER, 2009). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 92% da população mundial vive em locais onde os parâmetros da qualidade do ar superam os limites sugeridos pelo órgão (WHO, 2016), demonstrando um cenário preocupante.

O aumento da produção industrial, a crescente demanda por energia e a queima de combustíveis fósseis, associados à ampliação da frota de veículos automotores, contribuem para que a poluição do ar alcance níveis cada vez mais preocupantes, provocando sérios danos para a saúde e ao meio ambiente (KOÇ et al., 2009; EYIDOĞAN et al., 2010; BECK; ROSE; HENSHER, 2013). Ainda, o progresso econômico-social, gerando processos de urbanização, e o crescimento populacional levaram a um expressivo incremento da frota de veículos automotores, contribuindo para o aumento da taxa de emissões de poluentes atmosféricos (FERREIRA et al., 2008). Nesse contexto, como os motores a combustão interna continuarão sendo, nos próximos anos, a principal forma de propulsão dos veículos (MELO, 2007; MERKISZ, 2014), os impactos ao meio ambiente e à saúde pública gerados pelas emissões das fontes móveis são preocupantes, especialmente nos grandes centros urbanos (RANGEL; CARVALHO, 2003; ABRANTES et al., 2009) onde respondem pela principal parcela das emissões atmosféricas (GUARIEIRO, VASCONCELLOS; SOLCI, 2011; CARVALHO et al., 2015; TSAI; HUANG; CHIANG, 2017).

No Brasil a preocupação com as emissões veiculares não é recente. Em 1986, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que impôs um cronograma para reduzir gradualmente a emissão de poluentes gerados por veículos novos leves e pesados (IBAMA, 2011). O Programa foi inspirado nos modelos das legislações pioneiras dos Estados Unidos e Europa (MELO, COLNAGO;

LOUREIRO, 2009). Seguindo a mesma linha, em 2003, foi implantado o PROMOT - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares, devido ao crescimento expressivo da frota dessa classe de veículo automotor (IBAMA, 2011; SILVA; CARDOSO; SANTOS, 2011). A implantação da legislação de controle de emissões resultou em redução significativa nas emissões regulamentadas (SZWARCFITER; MENDES; LA ROVERE, 2005; DAEMME; PENTEADO; FERREIRA, 2010).

Como consequência da implantação da legislação, foram necessárias diversas mudanças tecnológicas nos veículos no Brasil, como a adoção de sistemas de injeção eletrônica e uso de conversores catalíticos para redução da emissão de poluentes, dentre outras. O mesmo se aplicou aos combustíveis, que tiveram suas formulações alteradas, como, por exemplo, a redução do teor de enxofre para possibilitar o avanço das tecnologias de conversão dos poluentes por catalisadores (RANGEL; CARVALHO, 2003; SZWARCFITER; MENDES; LA ROVERE, 2005; MARTINS et al., 2007).

Porém, mesmo com os avanços obtidos, outras questões devem ser abordadas, como a emissão de compostos não legislados ou sua formação nos catalisadores automotivos, que geram gases como a amônia ( $\text{NH}_3$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), contribuindo para o efeito estufa e a degradação da saúde pública (DURBIN et al., 2002; BORSARI; ASSUNÇÃO, 2010; PENTEADO; DAEMME; MELO, 2012; BORSARI, 2015). Ainda, deve ser considerada a necessidade de estudos sobre a degradação dos motores e sistemas de pós-tratamento com o uso dos veículos e seu impacto nas emissões, os benefícios da implantação de sistemas de inspeção veicular (BRANCO, F. C. et al., 2014) e de políticas de renovação de frota (SZWARCFITER; MENDES; LA ROVERE, 2005; GUIMARÃES; LEE, 2010).

Com objetivo de responder a algumas dessas questões e projetar cenários das emissões veiculares, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) apresentou em 2011 o primeiro Inventário Nacional de Emissões Veiculares, documento que apresenta estimativas das emissões veiculares brasileiras entre 1980 a 2020. Esse documento cita limitações, destacando a falta de estudos com informações reais dos fatores de emissões envolvendo a frota circulante. Dessa maneira, não foram considerados os efeitos das condições reais de uso e desgaste dos veículos em suas projeções (MMA, 2011). A segunda versão do inventário nacional, no ano de 2014, reconhece as mesmas limitações (MMA, 2014).

Em diversos países as pesquisas sobre os impactos ocasionados pelas emissões veiculares são subsidiadas por programas de estudos envolvendo veículos usados da frota, como nos Estados Unidos, onde teve início em 1989 o Auto Oil (CHOCK et al., 1995), fornecendo informações para o desenvolvimento de uma ampla gama de análises. O modelo do programa norte-americano teve como objetivo avaliar as emissões veiculares com uso de diferentes composições de combustíveis em veículos de diferentes tecnologias, idades e condições reais de uso, usando esses dados para gerar estudos da influência das emissões na atmosfera e benefícios ocasionados com a reformulação de combustíveis. No Japão, o JATOP (*Japan Auto-Oil Program*) teve início em 1997 e atualmente está em sua terceira fase de estudos. Também foram desenvolvidos estudos na Europa e no México (MACKINVEN; HUBLIN, 1996; SCHIFTER et al., 2004). Estudos isolados demonstraram que as emissões automotivas dependem das condições de uso, manutenção, tecnologias empregadas nos motores, sistemas de pós-tratamento e da qualidade e composição dos combustíveis utilizados (ZACHARIADIS; NTZIACHRISTOS; SAMARAS, 2001; SCHIFTER et al., 2004; AL-GHOUTI, AL-DEGS; AMER, 2008; DAEMME et al., 2014c, 2016d).

O Brasil possui condições específicas que devem ser consideradas nos estudos e controle das emissões veiculares, como características tecnológicas da frota e da matriz energética automotiva que difere dos demais países pela adição expressiva do etanol à gasolina e do biodiesel ao óleo diesel, sendo seu teor, em volume, elevado de 5% (B5) para 7% (B7) a partir de novembro de 2014. Em 2016 foi estabelecida uma nova política de aumento gradual do teor de biodiesel ao óleo diesel. A porcentagem de biodiesel adicionada ao óleo diesel terá um aumento de B7 para B8, B9 e B10, respectivamente nos anos de 2017, 2018 e 2019 (BRASIL, 2016), sendo previsto um teor de biodiesel de até 15% (B15), havendo comprovação da viabilidade técnica de seu uso. Essas medidas têm como objetivo alinhar a política de combustíveis com as metas estabelecidas para redução dos gases de efeito estufa assumidas pelo país na Conferência da ONU sobre mudanças climáticas em 2015 (COP 21).

Com adição de etanol, buscou-se eliminar a adição de chumbo à gasolina e aumentar sua octanagem, tendo esse processo findado em 1991 (SZWARCFITER; MENDES; LA ROVERE, 2005; SRINIVASAN; SARAVANAN, 2010). O Programa Proálcool visou, também, diminuir a dependência do Brasil ao petróleo internacional.

Foi implantado no Brasil o uso do etanol hidratado como combustível veicular alternativo (KOHLHEPP, 2010). Nesse contexto, o Brasil foi o primeiro país a lançar, em escala comercial, automóveis (2003) e motocicletas (2009) *flex fuel*, que possibilitam o uso de gasolina, etanol e suas misturas (MARTINES-FILHO; BURNQUIST; VIAN, 2006). Tais medidas propiciaram a continuidade do etanol combustível no mercado e essas condições de composição de frota e matriz de combustíveis levaram o cenário brasileiro a características únicas para as emissões automotivas.

A presente pesquisa se insere neste contexto, propondo avaliar as emissões automotivas em veículos leves de passageiros e motocicletas, dotados de diferentes tecnologias e idades e submetidos a condições reais de uso, abastecidos por diferentes composições de combustíveis. Utilizando-se de ensaios normalizados em laboratório, visa contribuir para o aprimoramento dos fatores de emissões do inventário nacional de emissões veiculares e propor a inclusão de novos compostos em seu banco de dados, como fatores de emissão para amônia e aldeídos em motocicletas.

Indicadores técnicos mais precisos, abrangentes e peculiares ao Brasil contribuirão para o desenvolvimento de políticas públicas com maiores chances de êxito. Indiscutivelmente as emissões de veículos pesados do ciclo Diesel são relevantes, principalmente no tocante a material particulado e NO<sub>x</sub>, porém não foram abordadas nesta tese.

## 1 1 OBJETIVOS

### **Problematização:**

Qual a influência da deterioração dos veículos leves de passageiros e motocicletas em condições de uso e conservação reais no inventário de emissões de poluentes regulados e não regulados no Brasil?

### **Justificativa:**

A influência da deterioração de veículos leves já é considerada no inventário nacional de emissões, porém com base em dados fornecidos pelos fabricantes dos veículos. Resta confirmar se a deterioração indicada corresponde à verificada na frota circulante. Nos casos das motocicletas, a deterioração não foi considerada nos



últimos inventários pela indisponibilidade de dados. Além disto, alguns compostos de notório interesse para a qualidade do ar não foram abordados. Ainda, questiona-se se essas informações seriam relevantes no cenário do inventário nacional.

### **Objetivo geral:**

Em virtude das lacunas de conhecimento, das motivações estabeleceu-se o seguinte objetivo geral desta tese:

Avaliar as emissões de poluentes regulados e não regulados de veículos leves de passageiros e da frota circulante sob ensaios normatizados, com diferentes combustíveis, com o objetivo de identificar os principais causadores de variabilidade nos fatores de emissões.

### **Objetivos específicos:**

Do objetivo geral da tese, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver um plano de ensaios que contemple amostras das diferentes fases que compõem o PROCONVE, para veículos leves de passageiros, e o PROMOT para motocicletas;
- b) Avaliar e propor fatores de emissão de compostos regulamentados considerando dados da literatura e de ensaios;
- c) Avaliar e propor fatores de emissão de compostos não regulamentados considerando os resultados de ensaios;
- d) Efetuar análise comparativa das emissões regulamentares com diferentes combustíveis;
- e) Elaborar cenários para estimativa de inventários de emissões para comparativo entre esta tese e a literatura.

### **Hipóteses da tese:**

A carência de informações sobre a deterioração da frota de motocicletas e de dados de emissões não regulamentadas, como, por exemplo, aldeídos em motocicletas e amônia, e a falta de informações das emissões de veículos mantidos

pelo usuário comum em condições de rodagem com uso de combustíveis comerciais apresenta uma lacuna de investigação com as seguintes hipóteses:

- a) Os efeitos da deterioração nos fatores de emissão observados na frota circulante podem ser diferentes dos fornecidos pela literatura;
- b) Possibilidade de capturar os efeitos de deterioração nos fatores de emissão através dos anos de uso dos veículos;
- c) Possibilidade de aprimorar as estimativas dos fatores de emissão para veículos leves e desenvolver fatores de degradação para motocicletas utilizando-se dados da literatura e ensaios normatizados em veículos da frota circulante.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A pesquisa desenvolvida na tese está centrada em elucidar qual a influência da degradação dos veículos e do uso de diferentes combustíveis nas emissões automotivas. A análise exploratória está fundamentada em amostras de veículos usados e novos, diferentes composições de combustíveis e em ensaios normatizados de laboratório para determinar os efeitos e inter-relações existentes, dos quais os resultados serão analisados através de métodos estatísticos.

Pesquisas semelhantes foram desenvolvidas em outros países (PAINTER; RUTHERFORD, 1992; ZEMROCH et al., 1996; TSUDA; ITO; NAKAMURA, 1999; SCHIFTER et al., 2004; HASSANI; HOSSEINI, 2016; TSAI; HUANG; CHIANG, 2017), porém não apresentaram resultados que considerem as condições específicas da matriz de combustível brasileira e novas proposições combinadas com as diversas fases tecnológicas e condições da frota local.

O inventário de emissões veiculares é um importante instrumento de avaliação e simulação de cenários envolvendo as tecnologias da frota automotiva e uso de diferentes combustíveis, porém as informações utilizadas no desenvolvimento dos inventários nacionais possuem diversas limitações (MMA, 2011, 2014). Esta tese visa desenvolver subsídios técnico-científicos que possibilitem o seu aperfeiçoamento. Assim, considerando fatores de emissão para projeções de acúmulo de quilometragem acima dos valores de 80.000 km fornecidos pelo inventário nacional, apresentam-se contribuições para adequação dos fatores das emissões regulamentadas da frota (HC, CO, NO<sub>x</sub> e aldeídos), por meio de equações para estimar a emissão de acordo com a degradação dos veículos pelo

seu uso. Propõem-se, além de ajustes nos fatores de emissão de  $N_2O$  e NMHC, estimados no segundo inventário nacional de emissões a partir de estudos de Borsari (2009) e dados do IPCC (2008), que também se estabeleça um fator de emissão de  $N_2O$  para motocicletos *flex fuel* utilizando etanol combustível.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos laboratoriais, apresenta-se uma relação entre as emissões de NMHC e THC em motocicletos, propiciando o cálculo das emissões de NMHC e  $CH_4$ , a partir das emissões de THC disponíveis nos bancos de dados existentes como, por exemplo, no IBAMA e na literatura relacionada. Ainda, propõem-se fatores de emissão para as emissões não regulamentadas de aldeídos em motocicletos, além de um fator para as emissões de amônia nos veículos leves de passageiros e motocicletos. As contribuições para o inventário de emissões compilam-se a partir de dados experimentais colhidos em amostras da frota circulante e ensaios normalizados e essa compilação dos dados pesquisados permitirá o entendimento das emissões dos veículos leves de passageiros e motocicletos e suas tecnologias em um cenário nacional.

### 1.3 DESENVOLVIMENTO DA TESE

Esta tese apresenta um modelo para determinação de fatores de emissão em veículos leves de passageiros e motocicletos, utilizando-se da combinação de dados de ensaios normalizados em laboratório e informações da literatura. O seu desenvolvimento foi dividido em capítulos, como demonstrado na sequência.

Uma introdução ao tema da pesquisa é apresentada no Capítulo 1, sendo ainda destacados os objetivos propostos e as contribuições galgadas.

O Capítulo 2 expõe a revisão da literatura no âmbito das emissões veiculares, abordando a legislação, formação de emissões, tecnologias automotivas, ensaios de emissão veicular e métodos para estimar inventários de emissões.

No Capítulo 3 detalham-se o delineamento dos experimentos, os métodos de ensaios empregados para determinação das emissões regulamentadas e não regulamentadas, bem como as ferramentas utilizadas para análise dos dados obtidos.

A determinação e a discussão dos fatores de emissão são tratadas no Capítulo 4, em que se mostram os resultados para as classes em estudo: motocicletos e veículos leves de passageiros. Explanam-se as fases do PROMOT e PROCONVE,

de acordo com a similaridade tecnológica dos veículos que as compõe, assim como se identificam os fatores de emissão para cada composto estudado e por anos de fabricação dos veículos.

No Capítulo 5 compara-se o desempenho dos diferentes combustíveis, utilizando ferramentas estatísticas, e sintetizam-se os resultados.

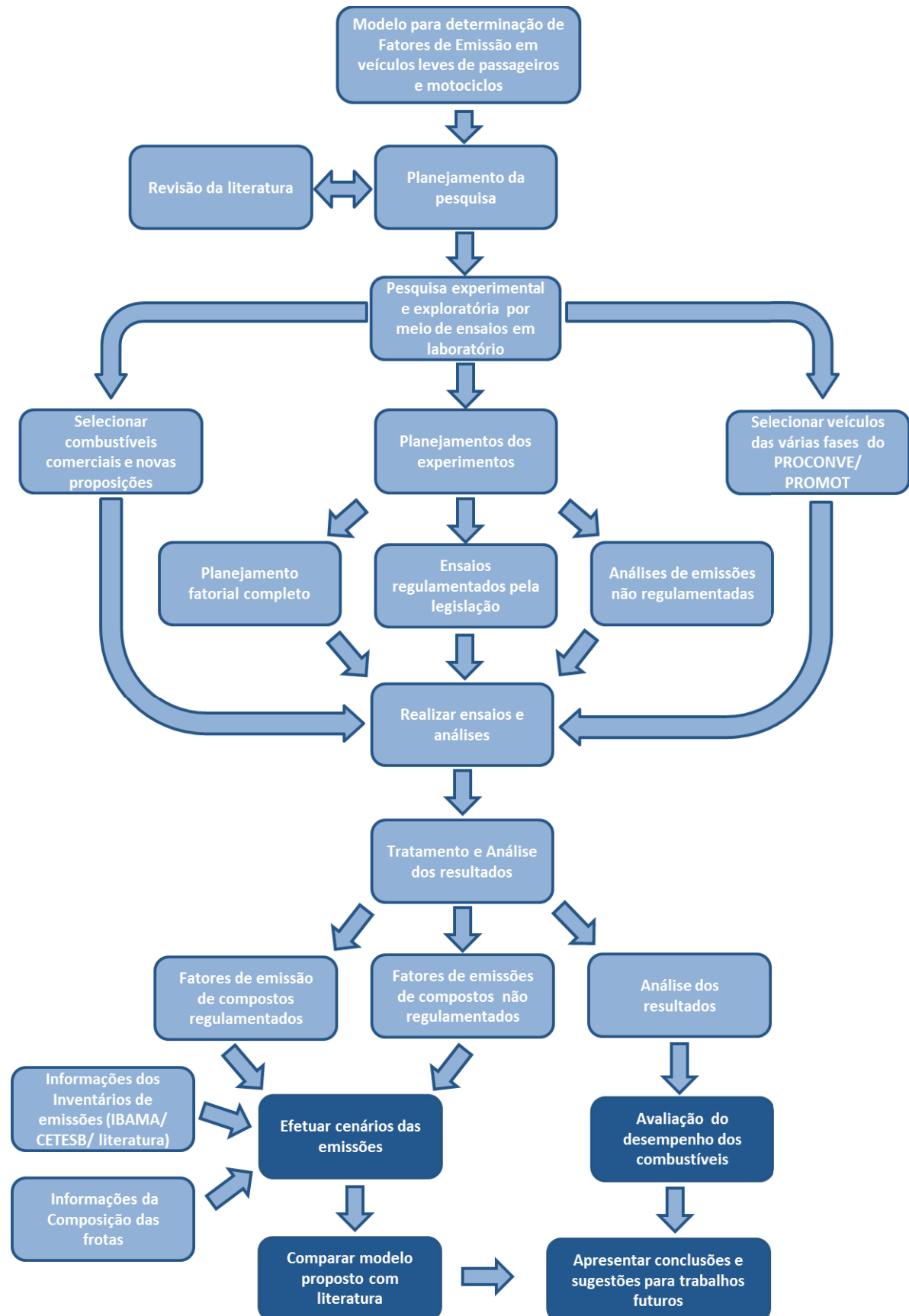
Discutem-se os cenários obtidos com aplicação dos fatores de emissão no Capítulo 6, abordando-os separadamente por categoria de veículos e, posteriormente, em conjunto, resumindo-se, ao final, os resultados obtidos.

No Capítulo 7 exibem-se as conclusões da pesquisa e indicam-se linhas para estudos futuros.

Informações complementares e detalhamento dos assuntos tratados nos capítulos apresentam-se em formato de Apêndices, dando maior fluidez para o leitor no acompanhamento das informações.

Na FIGURA 1 são ilustrados, de forma macro, os passos planejados para se atingirem os objetivos propostos pela presente tese em seu desenvolvimento. Observa-se que a pesquisa, baseada no princípio fenomenológico, está fundamentada na realização de ensaios normalizados e dados da literatura para propor um modelo que represente as emissões veiculares de veículos da frota nacional. Os dados experimentais combinados com informações da literatura e da frota possibilitam a estimativa de cenários das emissões veiculares. Esses dados, aliados a informações da participação da frota nas emissões e influência dos combustíveis, propiciam um banco de dados robusto para auxiliar a tomada de decisões por agentes reguladores e em pesquisas sobre a qualidade do ar.

FIGURA 1 – ESQUEMA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA



FONTE: O autor (2017).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Os temas abordados no presente capítulo apresentam a evolução da legislação brasileira de emissões desde sua implantação até as regulamentações de controle e, ainda, um resumo do princípio de formação dos gases regulamentados. Abordam-se, também, os compostos não regulamentados de interesse desta pesquisa, tecnologias automotivas, combustíveis, programas de ensaios e métodos desenvolvidos para mensurar e simular as influências desses parâmetros nas emissões automotivas.

### 2.1 AMBIENTE REGULATÓRIO

A Política Nacional de Meio Ambiente e o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) foram instituídos pela Lei 6.938/81 (BRASIL, 1981) e regulamentada pelo Decreto 99.274/90 (BRASIL, 1990), objetivando a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, visando assegurar no País condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana. Essa legislação criou o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo do SISNAMA, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente.

Em 1986 o CONAMA implantou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), com objetivo de regulamentar as emissões veiculares no país (BRASIL, 1986). O programa criou limites restritivos para as emissões de escapamento, a serem implantados de forma gradual, sendo fundamentado na legislação dos Estados Unidos da América (SZWARCFITER; MENDES; LA ROVERE, 2005). Com a evolução da regulamentação, os automóveis e combustíveis passaram por avanços tecnológicos para se adaptar às necessidades impostas (ZÁRANTE; SODRÉ, 2009; LEE et al., 2010; GOMES et al., 2014).

O programa previu inicialmente a regulamentação das emissões dos veículos leves de passageiros (automóveis), sendo sua primeira fase implementada entre 1988 e 1991. Para os veículos do ciclo Diesel, a implementação da regulamentação iniciou em 1990, para os motores pesados, e em 1995 para os veículos comerciais leves.

Seguindo a mesma linha, em virtude do crescimento expressivo da frota de motocicletas e por esses serem fontes relevantes de emissões de poluentes, foi criado em 2002 o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT) (BRASIL, 2002). A primeira fase teve início em 2003, e após seis anos de implantação, em 2009, o programa já adotava para o Brasil os mesmos limites aplicados na Comunidade Europeia, porém a legislação não levou em consideração as particularidades das condições locais, principalmente no tocante aos combustíveis: no Brasil a matriz energética prevê o uso de misturas de etanol anidro à gasolina em proporções de 20 a 27%, além do uso puro na forma de etanol hidratado.

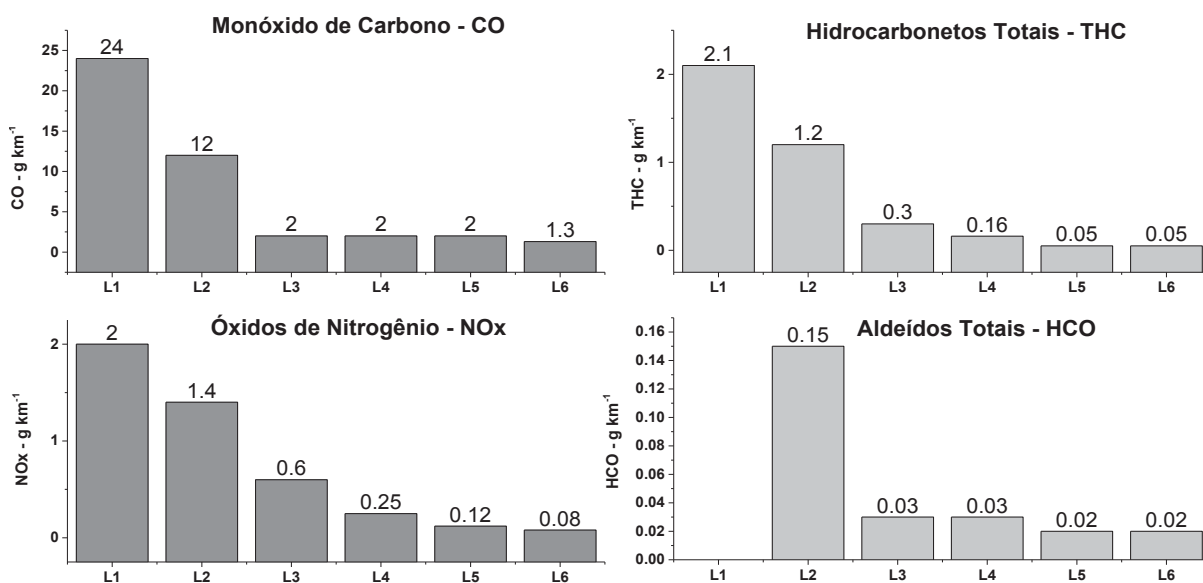
Os aldeídos são produtos químicos, resultantes da decomposição parcial do combustível no processo de combustão nos motores. A combustão incompleta gera diversos poluentes, entre eles os aldeídos. Devido à relação entre a emissão de aldeídos e o uso do etanol combustível (POULOPOULOS; SAMARAS; PHILIPPOPOULOS, 2001; DURBIN et al., 2007; YAO; TSAI; CHIANG, 2009; YANG et al., 2012), foram implantados os limites de controle da emissão desse poluente nos automóveis desde 1992. Para os motocicletas ainda não existe uma legislação para emissão desses compostos. No entanto, desenvolveram-se pesquisas nas condições locais de frota e combustíveis, e os resultados demonstram que as emissões de aldeídos em motocicletas são relevantes devido a seu impacto na qualidade do ar (DAEMME; PENTEADO; FERREIRA, 2010; DAEMME; PENTEADO; ZOTIN, 2012; SILVA, P. R. M. et al., 2014; SZWARC et al., 2014; DAEMME et al., 2014d).

O APÊNDICE 1 apresenta um resumo da evolução da legislação brasileira, descrevendo as fases implementadas pelo PROCONVE e PROMOT, bem como os limites de emissões e as principais tecnologias automotivas adotadas para cumprir as etapas normativas estabelecidas pelo programa para os veículos automotores.

Uma síntese da redução das emissões para os veículos leves de passageiros de acordo com avanço das fases do PROCONVE é apresentada na FIGURA 2. É possível observar uma redução gradual dos limites de emissões, desde a implantação do programa até o estágio atual, definido como L6, para o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e aldeídos totais. Observa-se que a partir da fase L4 foi alterada a legislação, sendo regulamentada a emissão de NMHC (hidrocarbonetos do tipo não metano),

substituindo os limites de emissão do total de hidrocarbonetos (THC). O NMHC correspondente à fração dos hidrocarbonetos totais menos o metano, compostos considerados mais reativos na atmosfera e precursores do ozônio troposférico, que são, ainda, considerados cancerígenos (GUO; WANG; LOUIE, 2004; SO; WANG, 2004; TANG et al., 2007). Para os motocicletas até o presente momento não existe uma regulamentação para emissão desses compostos nas legislações nacional e internacional.

FIGURA 2 – LIMITES DE EMISSÕES - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



FONTE: ANFAVEA (2009).

Com a mudança de método e a redução dos limites de emissões foi promulgada em 2004 a Instrução Normativa IBAMA 54/04 (IBAMA, 2011), autorizando a dedução da parcela de álcool não queimado (ANQ) dos hidrocarbonetos do tipo não metano. Posteriormente, em 2008, a ABNT publicou uma norma com procedimento para determinação da emissão de ANQ durante a realização de testes de emissões (ABNT, 2008). Emissões mais representativas de ANQ ocorrem principalmente na partida a frio, devido ao enriquecimento da mistura ar/combustível, quando se utilizam misturas de combustíveis com teor de etanol acima de 50 % (v/v). Essa abertura para desconto da emissão procurou não afetar o uso de etanol combustível, baseada no pressuposto de que a emissão de ANQ tem uma menor reatividade na atmosfera, quando comparada com os demais compostos orgânicos voláteis (COV) presentes nas emissões automotivas. Contudo, a legislação americana adota desde 2004 a regulamentação dos gases orgânicos do



tipo não metano (NMOG), método que soma as emissões de NMHC, ANQ e aldeídos, visando uma redução desses compostos na atmosfera (MELO, COLNAGO; LOUREIRO, 2009; MELO et al., 2012; BRANCO G. M. et al., 2014; SOUSA et al., 2014; SILVA, K. C. C. et al., 2014b, 2014d). Mais estudos sobre as emissões de ANQ, provocadas pelos veículos utilizando etanol, devem ser conduzidos para mensurar seus impactos na qualidade do ar e para verificar a adequação da legislação nacional.

A implantação do PROCONVE/PROMOT alavancou o desenvolvimento da indústria automotiva nacional, dos combustíveis, além da qualificação técnica da mão de obra industrial. No tocante à redução da emissão de poluentes, observam-se ganhos ambientais nos grandes centros urbanos (ORTIZ; MOTTA, 2002; CIFUENTES et al., 2004; SZWARCFITER; MENDES; LA ROVERE, 2005; IBAMA, 2011; ORTIZ et al., 2011; SOUZA et al., 2013). Porém, uma etapa prevista na implantação do PROCONVE – a realização de Programas para inspeção de emissões e manutenção veicular – não foi efetivamente implantada até o ano de 2017, sendo de fundamental importância para a eficiência do programa, pois garante a manutenção dos veículos e sistemas de controle de poluentes, além de dar suporte estatístico quanto às condições e rodagem da frota. Dados da inspeção em São Paulo (SP), onde o programa vigorou entre os anos de 2008 e 2012, demonstram índices de reprovação inicial média de 25% para o ano de 2010, sendo que a emissão desses veículos pode representar até 50% da emissão da frota (ANTP, 2011; CONTROLAR, 2011; IBAMA, 2011; MOTTA; SILVA; BRASIL, 2012; BRANCO, F. C. et al., 2014). Dados da frota americana constataam que cerca de 10% da frota é composta por veículos alto emissores e que esses respondem por aproximadamente 50% das emissões (SHAFIZADEH; NIEMEIER; EISINGER, 2004; PARK; RAKHA, 2009).

A legislação em vigor, fase L6, para os veículos leves de passageiros impõe um limite para a durabilidade dos sistemas de controle de emissões em até 80.000 km, comprovados com acúmulo de rodagem e testes de emissões (IBAMA, 2011). Contudo, esse procedimento é realizado sob manutenção e cuidados do fabricante, diferentemente do uso real pelos usuários comuns. Apesar disso, esses fatores de degradação, em condições controladas, são as informações atuais disponíveis para cálculos de inventários e projeções das emissões dos veículos em uso (VICENTINI, 2011; MMA, 2014; CANCELLI; DIAS, 2014).

A implantação do PROCONVE/PROMOT tem cumprido seus objetivos, pois, segundo projeções, mesmo com aumento da frota de veículos automotores, observa-se uma redução da concentração dos poluentes nos grandes centros, porém com tendência a uma estabilização nos patamares atuais (CETESB, 2015). Todavia, para maiores avanços, além da continuidade do programa, serão necessárias novas ações, como investir nos programas de inspeção veicular de emissões, legislar a emissão de aldeídos em motocicletas e alterar a atual política que possibilita a redução das emissões de ANQ dos valores finais de NMHC.

## 2.2 FORMAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES

O uso de motores a combustão interna continuará sendo dominante nas tecnologias de propulsão veicular nos próximos anos (MELO, 2007; MERKISZ, 2014; PAYRI et al., 2015). A Alemanha foi o primeiro país a propor uma agenda para o fim da produção de veículos movidos exclusivamente a motores de combustão interna, porém essa projeção é apenas para o ano de 2030 (SCHMITT, 2016). Diante desse cenário, as emissões veiculares e as tecnologias para sua redução continuam a ter relevante importância.

Conforme balanço teórico, o processo de combustão completa gera emissões apenas de água e  $\text{CO}_2$  (VLASSOV, 2001), porém, durante a operação real de um motor a combustão interna (MCI), essas condições não são alcançadas, gerando, além do  $\text{CO}_2$ , diversos compostos. Os poluentes com maior concentração nos gases de escape são o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (THC), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e material particulado (MP) em motores do ciclo Diesel (ADACHI; NAKAMURA, 2014). Ainda, observam-se emissões de aldeídos, dióxido de enxofre (proveniente do combustível), amônia, benzeno,  $\text{N}_2\text{O}$ , cianetos, hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (HPA), dentre outros.

As emissões de  $\text{NO}_x$  englobam os óxidos de nitrogênio (NO) e dióxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). Esses gases estão associados a uma ampla gama de efeitos ao ambiente, destacando-se: chuva ácida (via formação de ácido nítrico), geração de material particulado ultrafino ( $\text{MP}_{2,5}$ ) (via reação com amônia), eutrofização de meios aquáticos e a formação de  $\text{O}_3$  troposférico, elemento responsável por danos à saúde humana (MAUZERALL et al., 2005; KAMPA; CASTANAS, 2008). A legislação

automotiva atua sobre as emissões de  $\text{NO}_x$  visando principalmente à redução da concentração de  $\text{O}_3$  nos grandes centros urbanos. Destaca-se que, nos motores de combustão interna, são predominantes as emissões de  $\text{NO}$ , sendo formadas pela combinação do  $\text{N}_2$  (nitrogênio) da atmosfera, de maior relevância, ou desse composto existente no combustível com o oxigênio. O processo de formação do  $\text{NO}_x$  é favorecido com as altas temperaturas na câmara de combustão (BOWMAN, 1975; HEYWOOD, 1975, 1976), e ocorre com maior intensidade em regimes de  $\lambda$  – fator entre a relação ar/combustível admitida pelo motor e a relação ar/combustível ideal (estequiométrica) – maior que 1, ou seja, com excesso de ar (BOWMAN, 1975).

A emissão de  $\text{CO}$  provém da oxidação incompleta do carbono com oxigênio durante a queima de combustíveis formados por hidrocarbonetos, sendo sua concentração controlada primariamente pela relação ar/combustível. Processos de combustão em condições ricas (excesso de combustível) levam a um incremento da emissão de  $\text{CO}$ , devido à falta de oxigênio e baixa temperatura na frente de chama para oxidação total do carbono a  $\text{CO}_2$ . Já com a redução de combustível, com uma mistura pobre, ocorre a redução de sua formação (HEYWOOD, 1976). Após a propagação da chama, o  $\text{CO}$  resultante da combustão ainda pode ser convertido em  $\text{CO}_2$  em condições favoráveis de temperatura e pressão do fluido de escapamento, sendo o principal mecanismo de redução a reação com hidroxilas ( $\text{OH}$ ). O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e venenoso, que causa problemas respiratórios, cardíacos e está associado ao aumento da morbidade nos grandes centros urbanos devido à poluição atmosférica (BURNETT et al., 1998).

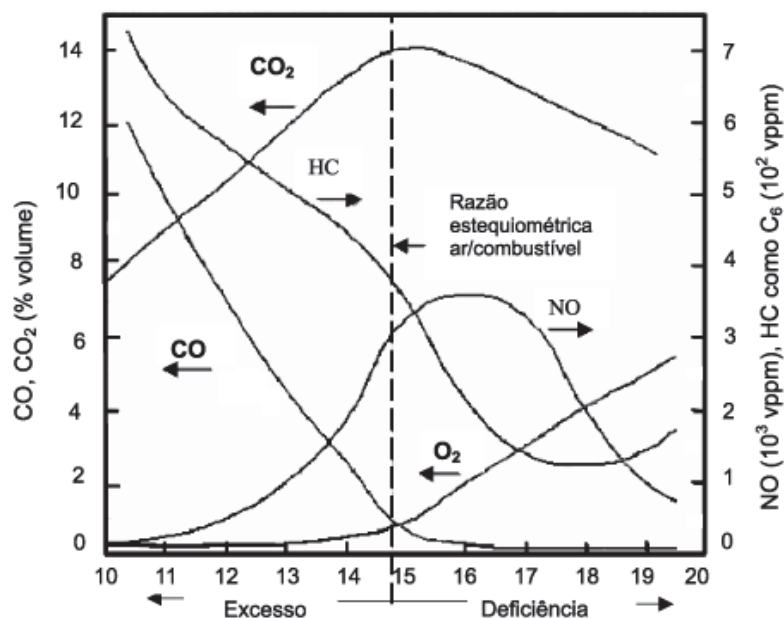
Os compostos orgânicos emitidos no processo de combustão incompleta são frações de combustível não queimado. A legislação prevê limites para emissão desses compostos, porém contabilizando apenas o total de emissão, não fazendo a especificação dos tipos de hidrocarbonetos. Compostos não regulamentados, como HPAs, não têm limites de restrição ou quantificação estabelecidos, sendo essas substâncias classificadas como carcinogênicas e mutagênicas (WESTERHOLM et al., 1988). Devido à instabilidade e afinidade desses compostos, eles envolvem-se em diversas reações na atmosfera gerando novos compostos, partículas e participando do processo de formação de  $\text{O}_3$ . Os processos de formação dos diferentes compostos orgânicos estão diretamente ligados à relação ar/combustível, ao tipo de combustível, processo de combustão e sistema de pós-tratamento

empregado nos veículos. Por exemplo, nas emissões de veículos a gasolina, Schauer et al. (2002) identificaram 66 hidrocarbonetos voláteis, 96 semivoláteis, 27 carbonilas (grupo dos aldeídos), além de partículas orgânicas.

Segundo Zhao (2007), diversos parâmetros da operação do motor contribuem para emissão de hidrocarbonetos e compostos orgânicos, como a partida a frio, instante em que o combustível injetado tem cerca de 20% de seu volume vaporizado, necessitando volume adicional de injeção para o funcionamento inicial do motor. O excesso de combustível fica estocado nas válvulas de admissão, paredes do cilindro, cabeça do pistão e pode contaminar o óleo do motor. Essas frações adicionais de combustível acumulado são emitidas nos próximos ciclos de abertura de válvulas em sua forma original ou frações leves. O desligamento do motor também é responsável por emissão de hidrocarbonetos, momento em que o combustível que acaba de ser injetado não é totalmente queimado, além de frações existentes nos dutos de admissão e bicos injetores, que são transportados para a exaustão.

Devido às características da matriz de combustíveis brasileira, que utiliza adição de etanol à gasolina, além de seu uso na forma hidratada, um tipo específico de hidrocarbonetos tem sua emissão regulamentada, os aldeídos. A emissão desses compostos é regulamentada para os veículos leves de passageiros do ciclo Otto desde 1992 (DAEMME et al., 2016c).

A FIGURA 3 apresenta o comportamento das emissões de gases com a relação da mistura ar/combustível (razão estequiométrica) para um MCI operando com gasolina. Observa-se ainda na figura uma faixa demarcada na região estequiométrica, onde o valor de  $\lambda$  é 1,0. Variações de  $\lambda$  entre aproximadamente 0,95 a 1,05, área chamada de janela catalítica, propiciam as melhores taxas de conversão catalítica aos compostos citados (FARRAUTO; HECK, 1999).

FIGURA 3 – RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE HC, CO E NO<sub>x</sub>

FONTE: Adaptado de RANGEL; CARVALHO (2003).

### 2.3 TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS E COMBUSTÍVEIS

O desenvolvimento das tecnologias automotivas de controle das emissões e dos combustíveis com propriedades, que propiciem um processo de combustão mais eficiente e limpo, está diretamente ligado às normas e exigências legais impostas por uma legislação específica de controle da poluição (GERARD; LAVE, 2005; NENTJES; DE VRIES; WIERMSA, 2007; LEE et al., 2010).

As primeiras tecnologias para redução de emissões foram desenvolvidas no final dos anos 1970, nos Estados Unidos da América (EUA), devido à implementação da legislação ambiental. Inicialmente modificações no motor contribuíram para redução das emissões, porém com a adoção de limites mais restritivos a partir de 1975, criou-se a necessidade do desenvolvimento de um sistema de pós-tratamento: o catalisador automotivo (TWIGG, 2011). A partir de 1986, o Japão e a Europa também adotaram o uso de catalisadores automotivos (SHELEF; MCCABE, 2000), e, desde então, as tecnologias automotivas empregadas para o controle das emissões não pararam de evoluir.

A principal tecnologia empregada para redução das emissões nos veículos do ciclo Otto é o catalisador, e essa tecnologia desenvolvida e empregada a partir de 1975 nos Estados Unidos é reconhecida como a mais eficiente e confiável para o

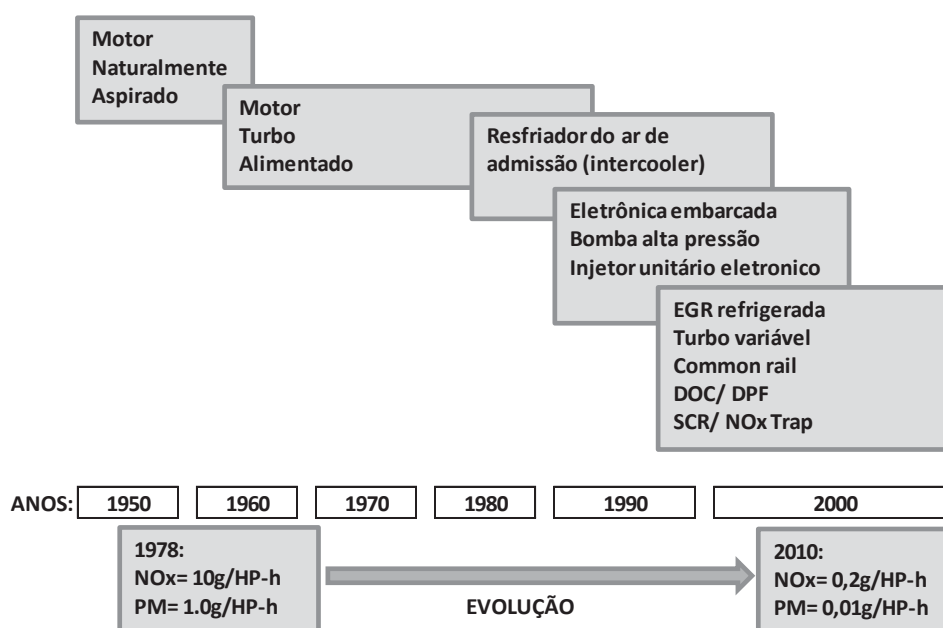
controle de emissões veiculares. Os primeiros catalisadores foram desenvolvidos para oxidação de HC e CO, não sendo necessário o controle sofisticado da razão ar/combustível (A/F). Com a restrição das emissões e maior controle sobre o NO<sub>x</sub>, foram necessárias mudanças no catalisador, que deveria também realizar o processo de redução para atuar sobre esse composto. Foram desenvolvidos catalisadores de dois estágios, um para oxidar HC e CO e outro para reduzir o NO<sub>x</sub>. Com isso o regime de funcionamento do motor deveria ter ciclos pobres, com excesso de ar propiciando a oxidação, e ricos, com excesso de combustível permitindo a redução do NO<sub>x</sub>, porém essa solução apresentou aumento do consumo de combustível e processos de formação de amônia no gás de exaustão. A solução foi o desenvolvimento eletrônico do sistema de injeção para propiciar um regime de funcionamento próximo à razão estequiométrica, com pequenas variações acima e abaixo, chamadas janelas catalíticas, permitindo que o catalisador efetuasse as operações de oxidação e redução. Com o controle eletrônico da razão ar/combustível, o catalisador pôde ser empacotado em um único leito, com a primeira aplicação em 1979, chamado de catalisador de três vias (TWC) (SHELEF; MCCABE, 2000; HECK; FARRAUTO, 2001; RANGEL; CARVALHO, 2003; MATSUMOTO, 2004). Com o aprimoramento dos sistemas de controle eletrônico do motor, a otimização do processo de combustão, o emprego de novos materiais e tecnologias, os sistemas de controle de emissões veiculares possibilitam emissões reduzidas (ZHAO, 2007).

Na partida a frio, os primeiros dois minutos de funcionamento do motor Otto são responsáveis por grande parte das emissões de escapamento. Para os hidrocarbonetos, em um ensaio de dinamômetro, esse regime pode representar até 90% das emissões. Isso se deve ao fato de o combustível não evaporar totalmente, necessitando um maior volume de injeção para propiciar a relação estequiométrica de queima, e de o catalisador encontrar-se abaixo da temperatura ideal de operação (*light-off*) (CRANE et al., 1997; WITZE; GREEN, 1997; STOVELL et al., 1999). Para redução dessas emissões, diversas tecnologias são utilizadas, destacando-se a aproximação do catalisador ao coletor de exaustão (*cloused-couple*), além de otimização da injeção (ZHAO, 2007; GUMUS, 2009), recurso muito empregado na fase L5 do PROCONVE.

Tecnologias aplicadas para veículos do ciclo Diesel também podem ser empregadas em veículos do ciclo Otto, como, por exemplo, válvula EGR e filtro de

partículas em veículos dotados de injeção direta de combustível. A FIGURA 4 apresenta uma síntese da evolução das principais tecnologias empregadas no controle de emissões em veículos do ciclo Diesel. Dentre os sistemas de pós-tratamento citados, destacam-se o uso de EGR, DOC, LNT, SCR e filtros de partículas, tecnologias descritas na sequência.

FIGURA 4 – TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DIESEL



FONTE: Adaptado de CHARLTON (2005).

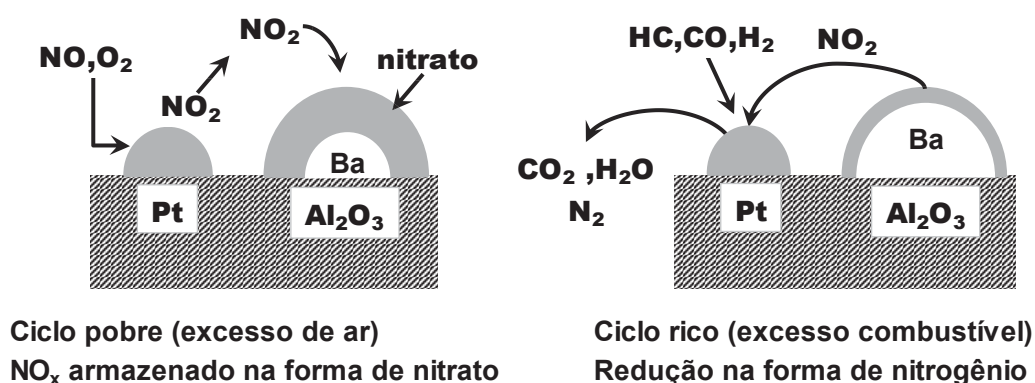
A válvula EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) tem a função de recircular os gases que já participaram do processo de combustão para reentrada no cilindro, seu efeito visa a diminuição da temperatura na câmara de combustão e, com isso, a redução da emissão de NO<sub>x</sub>. Nos gases de exaustão há uma maior concentração de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, que possuem um calor específico mais elevado que o ar de admissão (O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>), absorvendo mais calor na câmara de combustão, reduzindo sua temperatura. Ainda, esse processo diminui a disponibilidade de O<sub>2</sub>, alterando a relação ar/combustível, desacelerando a mistura O<sub>2</sub>/combustível, como consequência aumentando a extensão de chama e a área de contato chama/gás reduzindo a temperatura local. Outro efeito da diluição é baixar a pressão parcial do O<sub>2</sub> e o seu efeito sobre a cinética das reações de formação de NO. Esse processo se torna mais eficiente com adoção de sistema para refrigerar os gases de exaustão antes de sua reentrada na câmara de combustão, devido ao aumento da eficiência volumétrica e da capacidade de absorção de calor. O seu uso pode aumentar a



formação de material particulado e o consumo de combustível, visto que reduz a eficiência da combustão (ABD-ALLA, 2002; ZHENG; READER; HAWLEY, 2004; HOUNTALAS; MAVROPOULOS; BINDER, 2008; MAIBOOM; TAUZIA; HÉTET, 2008; AGARWAL; SING; AGARWAL, 2011).

O *Lean NO<sub>x</sub> Trap* (LNT) ou *NO<sub>x</sub> Adsorber Catalyst* (NAC) é um catalisador com a função de reter as emissões de NO<sub>x</sub> para posterior redução. Como os motores Diesel normalmente operam fora de relação estequiométrica, em regime pobre, ou seja, com excesso de ar em relação ao combustível, o processo de redução do NO<sub>x</sub> utilizado nos catalisadores de três vias se torna inviável. O catalisador LNT opera em conjunto com sensores e controle eletrônico do motor, ciclando regimes com excesso de combustível durante operação normal do motor. Em funcionamento normal do motor, regime pobre, o catalisador atua como uma armadilha seletiva de NO<sub>x</sub>, adsorvendo o composto em sua superfície. Nessa fase o NO<sub>x</sub> é oxidado na presença de metais nobres existentes no catalisador e armazenado na forma de nitrato. Na fase rica, ocorre a dessorção do NO<sub>x</sub>, que reage com os compostos provenientes do excesso de combustível (HC, CO e H<sub>2</sub>), ocorrendo a sua redução a N<sub>2</sub> (GECKLER et al., 2001; TSUMAGARI et al., 2006; DIGIULIO et al., 2014). Essa tecnologia pode causar um aumento do consumo de combustível em até 2% (JOHNSON, 2008). A FIGURA 5 apresenta o mecanismo simplificado do processo de redução de NO<sub>x</sub> em um catalisador LNT.

FIGURA 5 – PROCESSO DE REDUÇÃO DE NO<sub>x</sub> EM CATALISADOR LNT

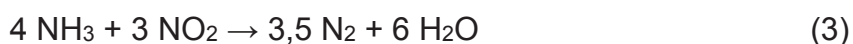
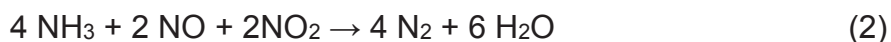
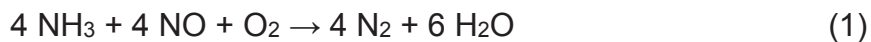


FONTE: Adaptado de TAKEUCHI; MATSUMOTO (2004).

O catalisador seletivo para redução de NO<sub>x</sub> (SCR - *Selective Catalytic Reduction*) é empregado em motores Diesel, que, devido às suas características de funcionamento, operando com excesso de ar, apresenta dificuldades no processo de



redução desse componente. O sistema se fundamenta na redução do  $\text{NO}_x$  através de reação química com  $\text{NH}_3$ . Segundo Koebel, Elsener e Madia (2001), as principais reações de redução envolvendo os compostos são:



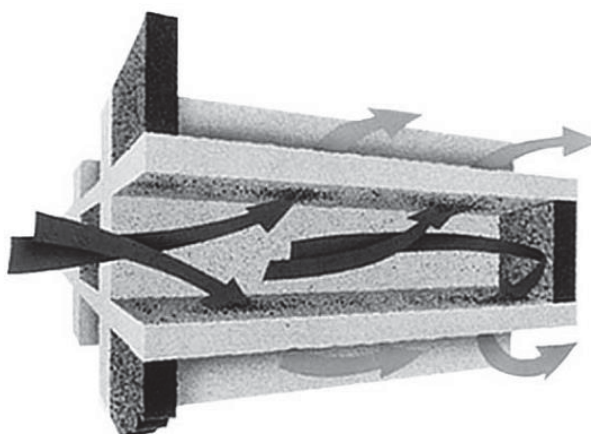
A amônia necessária ao processo é obtida por meio de injeção de uma solução aquosa contendo 32% de ureia no catalisador, denominada de ARLA (agente redutor líquido) (DAEMME et al., 2014b). Um injetor posicionado na entrada do catalisador é responsável por pulverizar o ARLA, que, na presença dos metais nobres do catalisador, é convertido em  $\text{NH}_3$ , permanecendo adsorvido até a reação com o  $\text{NO}_x$  (KLEEMANN et al., 2000). As injeções de ARLA são controladas por um sensor de  $\text{NO}_x$  na saída do SCR. Na legislação brasileira, a concentração residual máxima de  $\text{NH}_3$  nos gases de exaustão, para motores pesados, é restrita a 25 ppmv durante os ensaios de emissões (IBAMA, 2011). A relação de consumo ARLA/diesel fica em torno de 2% (JOHNSON, 2008), porém motores com esse sistema de pós-tratamento podem ter sua combustão otimizada, gerando uma redução de consumo de combustível de até 7% (GABRIELSSON, 2004; SCHÄR; ONDER; GEERING, 2006).

Pesquisas com aplicação das tecnologias SCR e LNT vem sendo desenvolvidas para uso em motores do ciclo Otto. O objetivo de usar um catalisador SCR nessa classe de veículos é possibilitar a redução do  $\text{NO}_x$  em motores que operam em regime de excesso de ar, ou seja,  $\lambda > 1$ . Nessas condições os catalisadores de três vias não possuem eficiência de conversão para o  $\text{NO}_x$ , sendo esse papel realizado pelo SCR. Para possibilitar essa operação, os motores são desenvolvidos para alternarem regimes de  $\lambda < 1$  durante o funcionamento. Nessas condições, os catalisadores de três vias propiciam a formação de amônia que fica estocada no SCR, sendo essa responsável pela redução do  $\text{NO}_x$  nos regimes de operação pobre ( $\lambda > 1$ ). O objetivo de operar os motores em faixas com  $\lambda > 1$  é buscar a redução no consumo de combustível (KIM et al., 2011;

DIGIULIO et al., 2014; PRIKHODKO et al., 2016; ADAMS; SKOGLUNDH; CARLSSON, 2017).

Os filtros para redução da emissão de material particulado (DPF - *Diesel Particulate Filter*) atuam na retenção das partículas emitidas durante o processo de combustão. Esses filtros são constituídos de material poroso cerâmico com alta densidade de canais paralelos, pelos quais os gases de exaustão são forçados a passar, ficando o material particulado retido (BOSCH, 2005). A FIGURA 6 ilustra a ação de um filtro de partículas, onde as setas escuras indicam a presença de MP no gás de exaustão e as setas claras, o gás após o processo de filtragem.

FIGURA 6 – ATUAÇÃO DO FILTRO DE PARTICULAS NO MP



FONTE: VAN SETTEN; MAKKEE; MOULIJN (2001).

O acúmulo de MP nas células do filtro ocasiona um diferencial de pressão no sistema de exaustão, que é monitorado por sensores. Ao atingir um nível preestabelecido de restrição, ocorre a regeneração, que é o processo responsável pela oxidação do MP acumulado, propiciando o contínuo processo de filtragem (VAN SETTEN; MAKKEE; MOULIJN, 2001). A regeneração pode ocorrer por oxidação do MP com  $\text{NO}_2$  (filtros CRT - *Continuously Regenerating Trap*) ou por meio da elevação da temperatura no interior do filtro, processo alcançado por meio de mudanças na combustão (retardo da injeção ou pós-injeção de combustível) (BOSCH, 2005; REŞITOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015).

Os filtros para material particulado podem reduzir em mais de 90% a emissão de MP, porém essa redução na massa pode ocasionar um aumento no número de partículas de menores tamanhos (KITTELSON et al., 2006; HERNER et al., 2007; BISWAS et al., 2008). Partículas com tamanho menor que  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ )

não são retidas no trato respiratório superior dos seres humanos, podendo atingir o pulmão e a corrente sanguínea, sendo mais prejudiciais à saúde (ANDRADE et al., 2012; WALSH, 2014). Devido a esses fatores, os limites de emissões na Europa (Euro VI) restringem, além da massa emitida de MP, também o número de partículas (GIECHASKIEL et al., 2014). A adaptação dessa tecnologia em veículos do ciclo Otto ocorre quando os motores são alimentados pelo sistema de injeção direta de combustível, que propicia um aumento nas emissões de material particulado, quando comparada ao sistema de injeção indireta (OSTAPIUK; DAEMME; PENTEADO, 2014; DAEMME et al., 2015; VILAR et al., 2015).

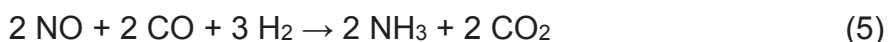
As tecnologias citadas podem ser usadas individualmente ou em combinações, dependendo dos compostos a serem tratados e dos níveis de emissões que o projeto visa atingir. Um exemplo é a associação das tecnologias LNT e SCR, onde os catalisadores colocados em série possibilitam reduzir o consumo de combustível necessário para a fase rica de redução no LNT e dispensar a injeção de ARLA no SCR (WANG et al., 2012; XU; MCCABE, 2012; DIGIULIO et al., 2014).

O acúmulo de quilometragem leva ao desgaste dos veículos ocasionando o aumento de suas emissões. A elevação das emissões está associada à idade dos veículos devido ao envelhecimento e degradação dos sistemas de pós-tratamento e de controle (ZACHARIADIS; NTZIACHRISTOS; SAMARAS, 2001).

O catalisador passa por processo de desativação com seu uso; além do desgaste natural, outros fatores reduzem sua eficiência, principalmente o envenenamento, formação de fuligem e desativação térmica (SILVA; VIANA; MOHALLEM, 2009). Os principais mecanismos de envenenamento são devido ao enxofre presente no combustível e ao fósforo oriundo do óleo lubrificante. Esses compostos reagem com a superfície do catalisador ocasionando a desativação dos sítios (BECK; SOMMERS; DIMAGGIO, 1994; SHELEF; MCCABE, 2000; RANGEL; CARVALHO, 2003).

Diversos países têm adotado a redução de enxofre nos combustíveis com o objetivo de reduzir sua emissão e buscando maior eficiência dos conversores catalíticos (MEJÍA-CENTENO; CASTILLO; FUENTES, 2012). Nos últimos anos, o Brasil, em sintonia com outros países, efetuou uma redução acentuada dos teores de enxofre nos combustíveis. Pode-se observar no APÊNDICE 2 uma visão geral do teor de enxofre no mercado mundial e sua evolução no combustível brasileiro. Por

outro lado, a redução do teor de enxofre nos combustíveis pode levar a um efeito negativo, ocasionando um aumento da emissão de amônia nos veículos dotados de catalisadores de três vias. Esse fato ocorre devido a um aumento na taxa de conversão do NO<sub>x</sub>, pois o processo de redução desse gás e a combinação com hidrogênio geram amônia (DURBIN et al., 2002; MEJÍA-CENTENO et al., 2007; MEJÍA-CENTENO; CASTILLO; FUENTES, 2012; OH; TRIPLETT, 2014; DAEMME et al., 2016d). As principais reações são:



A principal via de formação do H<sub>2</sub> é pela reação de troca água/gás (WGS – *Water-Gas Shift*) (MEJÍA-CENTENO; CASTILLO; FUENTES, 2012):



A intensidade da reação WGS, que ocorre nos catalisadores automotivos, está relacionada com a atividade de conversão. Assim a desativação dos conversores catalíticos leva à redução dessa reação (BARBIER JR; DUPREZ, 1994).

Os catalisadores de três vias também são responsáveis pelo aumento da emissão de N<sub>2</sub>O nos gases de escapamento (DASCH, 1992; WALLINGTON; WIESEN, 2014; DAEMME et al., 2014d). Os principais mecanismos de formação do composto nos catalisadores automotivos são (WEISS; CRAIG, 1976; DASCH, 1992):



As altas temperaturas e pressões durante o processo de combustão não apresentam um processo eficiente para formação do composto nos gases de combustão (HAO et al., 1987). Ainda, o processo de desativação dos catalisadores, ocasionado pelo seu uso, favorece maiores emissões de N<sub>2</sub>O aos veículos com

maior acúmulo de quilometragem quando comparados ao seu estado inicial (ODAKA; KOIKE; SUZUKI, 2000; LIPMAN; DELUCCHI, 2002).

A tecnologia veicular, os combustíveis e a manutenção aplicados aos automóveis são os principais responsáveis pelas suas emissões (AL-GHOUTI, AL-DEGS; AMER, 2008). As emissões automotivas têm relação direta com o nível de manutenção aplicado nos veículos pelos seus proprietários, que por outro lado, depende de sua renda e nível cultural (HARRINGTON, 1997; XUE; JIANG; LIANG, 2013). A manutenção inadequada aumenta as emissões em veículos usados (FU et al., 2001; PANDIAN; GOKHALE; GHOSHAL, 2009). São exemplos de uma manutenção inadequada: a falta de troca de lubrificante ou uso de especificação em desacordo com o fabricante, filtros de ar obstruídos, bicos injetores com depósitos ou desgastados; esses e/ou outros fatores podem levar a um desgaste anormal no motor, sistemas de pós-tratamento, além da contaminação do lubrificante por combustível, emissão de frações adicionais de lubrificante e interferências no processo de combustão. Outro fato que afeta as emissões é a realização de intervenções inadequadas executadas pelos usuários nos veículos automotores, como a mudança nos sistemas de exaustão dos veículos. Pesquisas indicam que aproximadamente 15% da frota de motocicletas da região metropolitana de São Paulo usam escapamentos modificados, na sua maioria sem a presença de catalisadores, ocasionando aumento nas emissões sonoras e de poluentes (FORCETTO; DAEMME, 2016, 2017).

O uso de combustíveis adulterados ou fora de especificação também contribui para a deterioração dos motores, sistemas de controle e de pós-tratamento, ocasionando aumento nas emissões automotivas (AL-GHOUTI, AL-DEGS; AMER, 2008; TAKESHITA et al., 2008; ABRANTES et al., 2009). A adoção de programas de inspeção veicular pode manter o veículo em patamares de emissões condizentes com sua tecnologia (ZACHARIADIS; SAMARAS; ZIEROCK, 1995).

A crescente demanda por energia gera uma pressão sobre as reservas de combustíveis fósseis, e novas alternativas de energias, com foco nas energias limpas e renováveis, tornam-se uma opção. Nesse cenário, os biocombustíveis são importante fonte de energia, principalmente no setor de transportes. Ainda, os efeitos devidos às emissões dos gases do efeito estufa, sendo os principais o CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, são incentivos ao uso de combustíveis renováveis.

O Brasil, desde 1930, adota política de adicionar etanol à gasolina, sendo o teor utilizado naquela época de 5%, visando uma redução na importação de gasolina (CORREIA, 1996). Desde então, a proporção assumiu diversos valores. A partir da década de 90, o teor de etanol na gasolina apresentou flutuações entre 18 e 25%, de acordo com a produção e as demandas do mercado. Em 2015 o limite máximo foi alterado, passando para 27% (VILELLA et al., 2015), sendo este adotado desde então.

Além do uso em mistura com a gasolina, o Brasil possui uma grande experiência no uso do etanol hidratado como combustível, principalmente após a implantação do programa Proálcool, que teve início em 1973 com a crise do petróleo (COLARES, 2008). Porém, o programa entrou em declínio nos anos 90, devido à queda do preço internacional do petróleo, à retirada pelo governo dos incentivos fiscais ao etanol e ao aquecimento do mercado internacional de açúcar (FREITAS; KANEKO, 2011). Um segundo marco importante na trajetória do etanol combustível foi a entrada no mercado brasileiro dos veículos *flex fuel*, em 2003, que propiciou a retomada da produção e a consolidação do etanol combustível no mercado nacional (KAMIMURA; SAUER, 2008).

A adição de etanol, combustível oxigenado, propicia um processo de combustão mais eficiente com a redução das emissões de compostos como CO e HC; outras características, como alta resistência à detonação e maior calor latente de vaporização, permitem um aumento da taxa de compressão e eficiência volumétrica. Já a emissão de NO<sub>x</sub> não possui uma tendência única, apresentando maior dependência dos parâmetros de funcionamento do motor (DEMIRBAS, 2009; KOÇ et al., 2009; MELO et al., 2012; BALKI; SAYIN; CANAKCI, 2014). Porém, o uso de etanol ocasiona um aumento das emissões de aldeídos e, devido ao seu menor poder calorífico, torna-se necessário um maior volume de combustível (MELO et al., 2012; YANG et al., 2012; DAEMME et al., 2014d). Ainda, o maior calor de vaporização do etanol (AGARWAL, 2007) pode ocasionar maiores emissões de álcool não queimado (ANQ) na fase fria de funcionamento do motor (MELO et al., 2012; TIMONEN et al., 2017). Essas emissões podem participar de reações na atmosfera, formando compostos secundários como ozônio e aldeídos (AKUTSU et al., 1991; SILVA, K. C. C. et al., 2014a, 2014c).

A adição de biodiesel no óleo diesel leva a uma redução nas emissões de CO, HC e MP devido à presença de oxigênio no combustível. Porém, devido ao seu

menor poder calorífico, o consumo de combustível aumenta. Pesquisas apontam para uma elevação das emissões de NO<sub>x</sub> com seu uso (AGARWAL et al., 2015; SHAHIR; JAWAHAR; SURESH, 2015). No tocante às emissões não regulamentadas de aldeídos, estudos demonstram que a adição de biodiesel ocasiona um aumento da emissão desses compostos (CORRÊA; ARBILLA, 2008; HE et al., 2009; KARAVALLAKIS; STOURNAS; BAKEAS, 2009).

Devido aos desafios de redução de consumo de combustível, tecnologias como a injeção direta de combustível em veículos do ciclo Otto começam a ser difundidas no Brasil. A motivação está correlacionada ao programa Inovar Auto do governo federal, que ofereceu vantagens aos fabricantes de automóveis por meio da redução de impostos para o atendimento de metas de eficiência energética (PASCOAL et al., 2014; PASCOAL; SILVA, 2014). Ocorre que essa tecnologia propicia uma maior geração de material particulado nas emissões automotivas (OSTAPIUK; DAEMME; PENTEADO, 2014). Em pesquisa sobre o tema com veículos *flex fuel* e combustíveis nacionais, observou-se o mesmo nível de emissões reportado na literatura internacional, com tendência de redução nas emissões com aumento do teor de etanol no combustível (DAEMME et al., 2015, 2016b).

As tecnologias automotivas e a especificação dos combustíveis evoluíram de acordo com as restrições impostas pela legislação. Para efetivação e manutenção dos propósitos de redução de emissões almejados pela legislação, é necessário que haja constantes ações de acompanhamento dos veículos e combustíveis, através de programas de fiscalização e controle e, ainda, o incentivo a pesquisas que cubram um aspecto mais amplo das interações entre novas tecnologias, seu desgaste e uso de diferentes combustíveis, visando atenuar efeitos indesejados que não fazem parte do escopo regulamentado.

## 2.4 ENSAIOS DE EMISSÃO VEICULAR

Os ensaios de emissão veicular objetivam uma reprodução das condições de uso dos motores ou veículos em uma situação padronizada, visando desenvolver e certificar suas emissões, *performance*, durabilidade ou situações específicas em estudo.

Os procedimentos não são padronizados mundialmente, e cada país adota um protocolo de ensaios de acordo com sua legislação e demandas. As primeiras



regulamentações, e com maior influência sobre os demais países, foram as legislações americana e europeia (FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996; BOSCH, 2005).

Os principais tipos de ensaios de emissões em laboratório são divididos em três grupos básicos: ensaios em dinamômetro de chassi; ensaios de emissão evaporativa e ensaios do motor em bancada dinamométrica.

Na realização de ensaios em dinamômetro de chassis, as principais legislações utilizam os mesmos fundamentos, ou seja, a condução do veículo em um ciclo de velocidade em função do tempo sobre dinamômetro de chassis. Durante esse percurso ocorre a coleta das emissões usando um amostrador de volume constante (AVC) (FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996). O dinamômetro de chassis é empregado para testes em veículos já em sua configuração motor/transmissão, em que as rodas propulsoras são posicionadas sobre um dinamômetro de rolos, que impõe uma resistência à rodagem, simulando os atritos aerodinâmicos, mecânicos e de pista (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2007).

Para a coleta das emissões nesse tipo de ensaio, utiliza-se um AVC, que se baseia na coleta total do gás de escapamento e sua diluição com ar. Dessa maneira, não se torna necessário medir as variações de volume do gás de escapamento, decorrentes dos diferentes regimes de rotação e torque ao qual o veículo é submetido, propiciando maior precisão aos cálculos finais da massa dos componentes pesquisados (HURN, 2012). Esse é o método mais empregado para medição de emissões automotivas com diluição da amostra (ADACHI; NAKAMURA, 2014) sendo implementada pela legislação americana em 1970 (HARVEY; SAITO, 2003). Outra vantagem do sistema é o uso da diluição dos gases de escapamento, evitando a formação de condensados que podem absorver partes dos compostos, subestimando as emissões ou interferindo na leitura dos detectores. A vazão do gás amostrado é controlada e medida continuamente com uso de um venturi de fluxo crítico.

A legislação brasileira adotou os conceitos, parâmetros de testes e ciclos da legislação americana para os ensaios de emissões, utilizando a simulação em dinamômetro das condições em pista para os automóveis, ciclo esse denominado FTP 75 (*Federal Test Procedure*), desenvolvido a partir de um trajeto que simula ruas da cidade de Los Angeles, Califórnia, em 1970, sendo revisado a partir de 1975 (KRUSE; HULS, 1973; KUHLE; KARSTENS, 1978). As condições e requisitos para



execução do ensaio são regidos pelo CFR – *Code Federal Regulation* (2000). Esse ciclo representa a simulação da condução de um veículo em um trecho urbano.

Para os ensaios de motocicletas, a legislação brasileira adotou os parâmetros da União Europeia, teste desenvolvido em dinamômetro de chassi com amostragem usando um AVC, utilizando para esse método os mesmos princípios dos ensaios realizados nos automóveis do ciclo Otto (EC, 1997; IBAMA, 2011). Quando a legislação foi atualizada em 2014, seguindo a tendência europeia, o Brasil passou a adotar o ciclo WMTC (*World-wide Harmonised Motorcycle Emissions Certification/Test Procedure*) para certificação das emissões em novos modelos de motocicletas. Esse ensaio utiliza a mesma filosofia da legislação anterior, porém com um ciclo e condições de condução mais representativos do uso real desses veículos (FAVRE et al., 2009). O ciclo WMTC teve seu desenvolvimento no grupo de especialistas em emissões e energia da Comissão Econômica das Nações Unidas para Europa (UNECE) com participação de representantes de vários continentes, sendo sua proposta a de se tornar um ciclo de uso mundial (STEVEN, 2002).

Usando a mesma premissa, a legislação europeia decidiu adotar o ciclo WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*) para os ensaios de emissões em automóveis a partir de 2017 (DELPHI, 2015), substituindo o ciclo NEDC (*New European Drive Cycle*) visando a utilização de um ciclo mais representativo das condições reais de uso de um veículo (DEMUYNCK et al., 2012; SILEGHEM et al., 2014). O WLTP foi desenvolvido por especialistas de vários países no grupo de regulamentação da UNECE, com objetivo de se tornar um procedimento mundial para testes de emissões. O Japão acenou que usaria o protocolo de testes, porém não estabeleceu prazos. Os Estados Unidos, apesar de terem participado do desenvolvimento, não sinalizaram intenção de adotar o ciclo.

Os compostos com limites regulamentados nas principais legislações mundiais se restringem, basicamente, ao controle da emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (MP) para veículos do ciclo Diesel e com injeção direta de combustível no ciclo Otto. Regulamentações como a dos EUA e do Brasil possuem limites para as emissões de aldeídos (formaldeído e acetaldeído). A emissão de  $\text{CO}_2$  está diretamente ligada à eficiência e consumo de combustível nos motores, sendo que as legislações americana e europeia possuem metas para redução dessa emissão (HARRINGTON, 1997; AN; SAUER, 2004; FONTARAS; DILARA, 2012). No Brasil,

em 2008, foi implantado o programa de etiquetagem, com intuito de classificar os veículos de acordo com seu consumo (BASTIN; SZKLO; ROSA, 2010). Em 2012 ocorreu a implantação do programa INOVAR AUTO, visando estimular a indústria automotiva através da redução da carga tributária (IPI). Como contrapartida, as montadoras devem comprovar uma redução de 12% no consumo de combustível até 2017, tendo como base o ano de 2012 (PASCOAL et al., 2014; PASCOAL; SILVA, 2014). A certificação desse consumo seguirá os mesmos processos de ensaio utilizados atualmente para verificação das emissões.

O APÊNDICE 3 apresenta informações da regulamentação de ensaios no cenário internacional, comentando sobre a legislação, limites de emissão e posicionando o Brasil no contexto mundial.

Os ensaios de emissões evaporativas têm por objetivo a determinação das emissões fugitivas de hidrocarbonetos provenientes do sistema de armazenamento de combustível dos veículos (FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996). O ensaio consiste em inserir o veículo em uma câmara selada (SHED - *Sealed Housing Evaporative Determination*) para mensurar as emissões de combustível evaporado. Esse método teve início de aplicação na legislação americana em 1978 (BLACK; HIGH; LANG, 1980), sendo adotado posteriormente por outros países (FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996). No Brasil, dois testes são empregados na medição das emissões evaporativas: a simulação de emissão diurna e as emissões de veículo a quente. As emissões evaporativas no teste que simula um veículo estacionado e recebendo calor do dia, emissão diurna, realiza-se com aquecimento do tanque de combustível, abastecido com 40% de sua capacidade, em uma faixa de temperatura de 16 a 29 °C. O ensaio tem duração de uma hora, sendo ao final determinada a concentração de hidrocarbonetos emitidos. Nas emissões a quente, o veículo é colocado na câmara SHED imediatamente após a realização do percurso do ensaio de emissões em dinamômetro e o ensaio tem duração de uma hora (WILLIAMS; LIPARI; POTTER, 1990; FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996). O ensaio de emissões evaporativas adotado pela legislação brasileira vigente é baseado na regulamentação americana, cujos procedimentos para realização estão descritos na NBR 11481 (ABNT, 2010c).

Existem ainda outras modalidades de testes adotados na legislação americana, como a emissão evaporativa simulando o deslocamento do veículo sobre um dinamômetro e a emissão evaporativa durante o processo de abastecimento

(FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996). No Brasil, a Associação de Engenharia Automotiva (AEA) possui um grupo de trabalho sobre as emissões evaporativas durante o processo de abastecimento (AEA, 2015b). Esses estudos possibilitarão o desenvolvimento de um método para determinação dessas emissões visando pesquisar sua relevância e futuro controle.

Os ensaios de emissões de escapamento em veículos de grande porte, como ônibus e caminhões, denominados motores pesados, são realizados em dinamômetros de bancada, em que apenas o motor é testado, visando simplificar e reduzir os custos de estruturas destinadas à realização dos testes. No ensaio de bancada, o eixo de transferência de potência do motor é ligado diretamente a um dinamômetro, possibilitando a simulação de torque e rotação. Esse método é utilizado para desenvolvimento, certificação e durabilidade de motores, componentes e testes em combustíveis.

Para os ensaios de certificação de emissões em motores pesados, o Brasil adotou o método europeu de ensaios, com seus limites e procedimentos de ensaios. Os limites de emissão da legislação brasileira têm acompanhado a legislação europeia com defasagem de um nível de regulamentação (CETESB, 2010): em 2015, o Brasil se encontra na fase P7, equivalente ao Euro V; já na Europa, está em vigor a legislação Euro VI.

Uma inovação implantada na legislação europeia foi a chamada emissão real (*real world*), onde os veículos além dos testes de laboratório devem passar por ensaios em condições reais de uso, procedimento que teve início de aplicação no ano de 2017 (DELPHI, 2015). Diversas pesquisas realizadas demonstram que as condições reais de operação podem apresentar emissões com níveis mais elevados que os obtidos em laboratório (COCKER et al., 2004; PELKMANS; DEBAL, 2006; DUARTE; GONÇALVES; FARIAS, 2014; HAO et al., 2015). No ano de 2015 uma das maiores montadoras de automóveis do mundo foi flagrada pelas autoridades americanas fraudando os procedimentos de ensaios na certificação das emissões de seus veículos leves do ciclo Diesel (VOLKS, 2015). Informações como essa devem ser consideradas na evolução das legislações regulatórias, dos procedimentos de testes e no acompanhamento por parte das autoridades dos ensaios de certificação, na fiscalização e monitoramento das emissões veiculares.

## 2.5 EMISSÕES NÃO REGULAMENTADAS

Com o aperfeiçoamento das legislações de emissões veiculares e implantação de limites cada vez mais restritivos para as emissões regulamentadas, as emissões não regulamentadas assumem um papel relevante (TAN; HU; LOU, 2009). As pesquisas de compostos não regulamentados são escassas, sendo que essas emissões normalmente possuem uma concentração mais baixa, quando comparadas às regulamentadas, porém em muitos casos são compostos mais nocivos ao ambiente e à vida (ZHANG et al., 2010). Nesse cenário, a pesquisa de compostos não regulamentados para avaliação de seu impacto é essencial, fornecendo subsídios para que as políticas públicas possam criar ou rever a legislação existente (KARLSSON, 2004; BORSARI, 2015).

Os principais componentes regulamentados das emissões veiculares (CO, NO<sub>x</sub>, THC) possuem métodos e tecnologias para sua quantificação e controle já consolidados, sendo utilizado o catalisador automotivo como principal meio de controle. A implantação de catalisadores automotivos teve por finalidade a redução das emissões regulamentadas, porém, devido a reações indesejadas no processo de catálise, podem ser gerados outros compostos não regulamentados (HARVEY et al., 1983), como a amônia (NH<sub>3</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (ODAKA; KOIKE; SUZUKI, 2000; DURBIN et al., 2002; HEEB et al., 2006; LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009; PENTEADO et al., 2013; DAEMME et al., 2014d). As emissões de NH<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O são consideradas subprodutos incompletos da redução NO<sub>x</sub> em catalisadores de três vias (JIMÉNEZ-PALACIOS, 1999; HEEB et al., 2008). A formação de amônia no catalisador é atribuída a reações entre NO<sub>x</sub> e H<sub>2</sub> (LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009). Heeb et al. (2006) observaram em seus experimentos emissões de NO<sub>x</sub> pós-catalisador menores quando a formação de NH<sub>3</sub> foi mais intensa e vice-versa. O hidrogênio que participa das reações é proveniente do processo de combustão, em menor quantidade, e de reações água/gás (WGS) entre a H<sub>2</sub>O e o CO (BARBIER JR.; DUPREZ, 1994; WHITTINGTON; JIANG; TRIMM, 1995). O processo de formação da amônia ocorre após o aquecimento do catalisador e com maior intensidade em regimes de riqueza da relação ar/combustível (HEEB et al., 2008). Estudos relatam que, em condições de riqueza ( $\lambda < 1$ ), ocorre uma maior emissão de CO (DURBIN et al., 2003; HEEB et al., 2006, 2008), possibilitando maior emissão de H<sub>2</sub> pelo mecanismo de reação água/gás. Nos motocicletos, devido ao

menor controle da relação ar/combustível (CHAN et al., 1995), as emissões de amônia podem ser intensificadas (HEEB et al., 2008; DAEMME et al., 2014d).

A amônia é um dos principais compostos nitrogenados reativos provenientes das emissões veiculares (SUN et al., 2017), podendo participar de reações secundárias na atmosfera, gerando outros compostos. Dentre esses, destaca-se a formação de material particulado ultrafino ( $PM_{2.5}$ ) que tem grande impacto na saúde pública (DURBIN et al., 2002; ANDRADE et al., 2012), responsável por doenças como asma, bronquite e câncer (WHO, 2013). Nos grandes centros, a principal fonte de amônia é atribuída aos motores de combustão interna dos veículos automotores (BATTYE; ANEJA; ROELLE, 2003; LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009). No cenário nacional, alguns trabalhos relatam emissão de amônia nas condições locais de frota e combustíveis (DAEMME et al., 2014a, 2014b, 2014d; BORSARI, 2015); porém, segundo Borsari (2015), não existem dados suficientes sobre a frota circulante que possibilitem estimar um fator de emissão desse composto. O processo de degradação do catalisador, com seu uso, ocasiona uma mudança nas emissões de  $NH_3$ , sendo que a desativação catalítica reduz a formação desse composto (LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009). O processo inverso entre a emissão de amônia e  $NO_x$  foi observado também por Kean (2009) em experimentos realizados em túneis.

Uma possível solução para a redução das emissões de amônia em motocicletas foi abordada por Daemme et al. (2013) com uso de protótipo de catalisador SCR, colocado de forma externa ao conjunto de escapamento original do veículo. O objetivo do estudo foi verificar a viabilidade do uso de um catalisador SCR que reduzisse a amônia produzida de forma indesejada em conjunto com o  $NO_x$  emitido. A pesquisa demonstrou a possibilidade de reduzir as emissões de amônia e  $NO_x$  em 44% e 38% respectivamente.

O  $N_2O$ , importante gás do efeito estufa devido a sua estabilidade, possui um longo tempo de permanência na atmosfera (acima de 100 anos) e um potencial para o efeito estufa cerca de 300 vezes superior ao do  $CO_2$  (BECKER et al., 1999; HUAL et al., 2004). Estudos demonstram que sua concentração na atmosfera vem aumentando ao longo dos anos, com 276 ppb no período pré-industrial e, atualmente, com aproximadamente 315 ppb (MACHIDA et al., 1995; SEINFELD; PANDIS, 2012). Borsari e Assunção (2012) efetuaram ensaios em veículos da frota nacional para estimar um fator de emissão para o  $N_2O$ , utilizando uma amostra de

21 veículos leves do ciclo Otto, fabricados entre 1995 e 2008. Os fatores médios de emissão foram de  $0,017 \text{ g km}^{-1}$  para uso de etanol e  $0,068 \text{ g km}^{-1}$  para uso de gasolina A22. Na pesquisa não se abordaram as emissões em motocicletas e veículos do ciclo Diesel. Para determinação da concentração das emissões foi utilizada a técnica de FTIR e infravermelho não dispersivo, sendo que a amostragem foi dos gases de escapamento diluídos em sacos de tedlar®. Os inventários da CETESB (2015) e MMA (2011, 2014) utilizam esses dados em conjunto com estimativas do IPCC para estimar as emissões desse composto em suas projeções, devido à ausência de dados para as condições locais de frota e combustíveis (DIAS; BALES; SILVA 2014a, 2014b). Porém os dados estimados pelo IPCC não levam em consideração as condições brasileiras de composição do combustível, uso de etanol combustível, tecnologias automotivas e sua degradação, ocasionando possíveis desvios nas projeções.

No tocante a emissões de aldeídos, para as condições brasileiras de utilização de motocicletas, as pesquisas demonstram valores significativos, principalmente quando se trata de motocicletas que utilizam tecnologia *flex fuel*, que permite uso de 100% de etanol hidratado combustível (DAEMME; PENTEADO; FERREIRA, 2010; DAEMME; PENTEADO; ZOTIN, 2012; SZWARC et al., 2014; DAEMME et al., 2014d). A literatura internacional apresenta resultados de emissões de aldeídos em motocicletas e veículos do ciclo Diesel, alertando quanto ao incremento desses compostos com a adição de etanol e biodiesel aos combustíveis tradicionais (CORRÊA; ARBILLA, 2006; HE et al., 2009; YAO; TSAI; CHIANG, 2009; YANG et al., 2012; MELO et al., 2014). O incremento na emissão desses compostos, ocasionado principalmente pela presença de compostos oxigenados nos biocombustíveis (STUMP et al., 1996; XUE; GRIFT; HANSEN, 2011), é relevante quando se observa a composição da matriz de combustíveis brasileira, com uso de misturas de etanol à gasolina de até 27% (v/v) e uso de 100% de etanol na forma hidratada; já no diesel, o teor de biodiesel atualmente é de 7% (v/v). Os aldeídos são substâncias químicas que podem causar problemas respiratórios, irritação dos olhos, sendo classificados como cancerígenos (formaldeído) e potencialmente cancerígenos (acetaldeído). Ainda, devido a sua instabilidade química, podem participar de diversas reações na atmosfera, destacando-se a formação do ozônio de baixa altitude, elemento oxidante das vias respiratórias e de materiais (KRAHL et al., 1996; ABRANTES; ASSUNÇÃO; HIRAI, 2005; TEIXEIRA et al., 2009; CORRÊA



et al., 2010; KUMAR et al., 2011). As emissões de aldeídos reportadas nos inventários nacionais contemplam apenas as emissões dos veículos leves do ciclo Otto (MMA, 2011; DIAS; BALES; SILVA, 2014b), devido à não regulamentação dessas emissões para motores do ciclo Diesel e motocicletas, sendo essas informações escassas e negligenciadas.

Dentre as técnicas para medição de emissões não regulamentadas, a espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) desponta como importante ferramenta na avaliação de emissões veiculares, sendo usada em diversas pesquisas para mensurar emissões de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , aldeídos e outros compostos (HELLER et al., 1990; ROBERTS; LOWRY, 1994; DURBIN; NORBECK; HUAI, 2001; DURBIN et al., 2002; ANDERSSON.; LANCE; JEMMA, 2003; LEA-LANGTON, ANDREWS, 2009; BERMÚDEZ et al., 2011).

Equipamentos com detectores de FTIR foram adaptados para amostragem e medição de compostos automotivos utilizando-se de linhas aquecidas, bombas e desumidificadores, propiciando assim uma análise simultânea, fácil e rápida de mais de 20 compostos, em uma frequência de aquisição de 1 a 10 Hz.

A análise por FTIR se baseia no princípio de que a radiação infravermelha emitida pelo interferômetro em todo o seu espectro é absorvida pelas moléculas presentes na amostra e convertida em energia de vibração molecular. O sinal resultante representa o espectro molecular de absorção e transmissão, criando uma impressão digital da amostra. Como cada material diferente é uma combinação única de átomos, não há dois compostos com exatamente o mesmo espectro infravermelho, tornando a técnica valiosa na identificação e quantificação de compostos (CIENFUEGOS; VAITSMAN, 2000).

Trabalhos comparando as técnicas normalizadas de medição de compostos com a técnica FTIR apresentam resultados correlacionáveis (HAACK; LACOURSE; KORNISKI, 1986; KAWARABAYASHI et al., 1990; LOWRY; KLEBBA; ROBERTS, 1995; DURBIN et al., 2002; REYES et al., 2006; DAEMME; PENTEADO; MELO, 2012; TORRES; REDÍGOLO; FLORES, 2014) e também citam as vantagens de seu uso, entre as principais: a aquisição contínua de dados, a rapidez na obtenção de resultados e a dispensa do uso de gases de calibração.

Devido à facilidade de uso e boa correlação de resultados, o método de análise por FTIR foi homologado para realização da quantificação das emissões de  $\text{NH}_3$  e  $\text{N}_2\text{O}$  da área automotiva pelas regulamentações americana e europeia (CFR,

2012; EC, 2012). O CARB (2007) orienta que a coleta e a análise da  $\text{NH}_3$  em emissões veiculares devem ser realizadas instantaneamente após a amostragem, devido à alta reatividade do composto.

Métodos específicos para determinados compostos, utilizando-se de técnicas como espectroscopia de massa ou cromatografia, podem conduzir a resultados mais precisos, porém necessitam de técnicas especializadas de amostragem, extração e análise, inviabilizando uma amostragem mais ampla por motivos econômicos e pelo fator tempo.

## 2.6 INVENTÁRIOS DE EMISSÃO

O inventário de emissão veicular (IEV) é uma ferramenta desenvolvida para simular e estimar as emissões veiculares de uma dada região em um determinado período. Provê informações importantes para gestores públicos, para pesquisadores e para a sociedade sobre as diferentes fontes e as emissões totais dos componentes em estudo, podendo ser utilizado como instrumento de planejamento estratégico para determinar a atuação na mitigação e controle dos poluentes.

Os métodos de inventários podem ser divididos em *bottom-up* e *top-down*. No método *bottom-up*, as emissões totais são quantificadas a partir das emissões típicas de cada categoria de veículo (chamado “fator de emissão”), o número de veículos e a respectiva intensidade de uso, que é a distância percorrida durante o período inventariado (VICENTINI, 2011). Esse método exige informações detalhadas da frota e suas emissões. Para correção de valores de intensidade de uso no inventário, a distância percorrida pelos veículos pode ser ajustada pelo consumo de combustível observado na região de interesse (DIAS; BALES; SILVA, 2015).

O método *top-down* apropria-se de informações do total de combustível consumido na região inventariada para determinação das emissões, utilizando como premissa os valores médios de emissão por quantidade de combustível queimado. Devido à influência das tecnologias automotivas e condições da frota nas emissões de compostos como HC,  $\text{NO}_x$  e CO, esse método não apresenta boa correlação com as emissões reais, sendo empregado principalmente para determinação de emissões de  $\text{CO}_2$  e estudos preliminares de emissões (BORSARI; ASSUNÇÃO, 2010; VICENTINI, 2011).



Os principais inventários de emissão veicular apresentados no Brasil utilizam como principal método o *bottom-up*, estudos esses desenvolvidos pelo MMA e pela CETESB. Nesses inventários o cálculo das emissões veiculares se baseia na equação (11) (MMA, 2014; CETESB, 2015):

$$E = F_r \times I_u \times F_e \quad (11)$$

sendo:

E - a taxa de emissão no período inventariado ( $\text{g ano}^{-1}$ );

$F_r$  - a frota circulante de veículos ano-modelo considerado (número de veículos);

$I_u$  - a intensidade de uso do veículo do ano-modelo considerado, expressa em termos de quilometragem anual percorrida ( $\text{km ano}^{-1}$ );

$F_e$  - o fator de emissão do poluente considerado, expresso em termos de massa de poluentes emitida por km percorrido ( $\text{g}_{\text{poluente}} \text{km}^{-1}$ ). É específico para ano-modelo da classe de veículo considerado e depende do combustível usado.

Os dados para compilação dos fatores de emissão dos inventários nacionais provêm da CETESB. A CETESB, credenciada pelo IBAMA como Agente Técnico Conveniado (ATC) para as questões de homologações e acompanhamento operacional do PROCONVE e PROMOT, detém informações sobre as homologações, ensaios de conformidade de produção e, também, sobre a comprovação de atendimento das emissões de durabilidade (IBAMA, 2011). Essas informações são importantes para conhecimento dos valores de emissões dos veículos novos que compõem a frota brasileira e sua taxa de degradação. Anualmente, desde 2002, a CETESB apresenta em seu *site* valores da emissão de certificação e de controle de produção dos veículos comercializados no Brasil (BORSARI; ASSUNÇÃO, 2010).

Na TABELA 1 apresentam-se os poluentes inventariados no Segundo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, para o ano base de 2012, observando-se a falta de informações das emissões de aldeídos para os motocicletos e veículos do ciclo Diesel.

Dentre as limitações citadas nos inventários do MMA e da CETESB, destaca-se a desconsideração das condições normais de uso, desgastes e manutenção dos veículos. Utilizam-se dados de certificação e ensaios de

durabilidade, conduzidos em condições controladas pelo fabricante, para determinação dos fatores de emissão, fato justificado pela carência de dados da frota em condições que superem as abrangidas pelos 80.000 km dos testes de durabilidade. Ainda, nos dados dos inventários citados, para motocicletas, não foi considerada deterioração das emissões por não haver informações de testes de durabilidade para essa categoria de veículo. As emissões de NMHC, para motocicletas, veículos diesel e leves das fases anteriores à fase L4, foram estimadas com base em um fator de proporção entre as emissões de THC e CH<sub>4</sub> – proposto por Borsari (2005) e Borsari e Assunção (2010) e determinadas por meio de ensaios em veículos leves de passageiros. Observa-se uma carência de informações sobre emissões de NMHC em motocicletas na literatura especializada, pois sua homologação é realizada com base na emissão de THC. Apesar das limitações citadas, os inventários são importante fonte de conhecimento sobre o perfil das emissões automotivas, necessitando-se um refinamento contínuo de seus métodos e bancos de informações. Deve-se, ainda, buscar ampliar seu escopo de estudo, investigando emissões de novos componentes prejudiciais à saúde pública e ao meio ambiente.

TABELA 1 – POLUENTES DO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES

Poluentes	Automóveis e comerciais leves do ciclo Otto		Motociclos		Veículos do ciclo Diesel	Veículos à GNV
	Gasolina C	Etanol Hidratado	Gasolina C	Etanol Hidratado		
CO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NO <sub>x</sub>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MP*	✓		✓		✓	
Aldeídos	✓	✓				✓
NMHC	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CH <sub>4</sub>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CO <sub>2</sub>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
N <sub>2</sub> O	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Emissão evaporativa de NMHC	✓	✓				
Emissão por desgaste de freio e pneus (MP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Emissão desgaste de pista (MP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

FONTE: MMA (2014).

NOTA: \* Material particulado gerado pela queima de combustíveis.

## 2.7 PESQUISAS DE EMISSÕES VEICULARES EM FROTAS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE COMBUSTÍVEIS

Com o objetivo de conhecer e entender a influência de mudanças na composição de combustíveis automotivos na frota, alguns países desenvolveram programas para testar amostras de veículos usados e avaliar os possíveis efeitos da mudança em sua matriz energética de combustíveis sobre as emissões veiculares e dessas sobre o meio ambiente.

Nos Estados Unidos foi efetuado o primeiro programa com a finalidade de pesquisa das emissões automotivas com alterações na matriz de combustíveis, programa chamado de *Auto Oil* – programa de pesquisa para melhoria da qualidade do ar (AQIRP – *Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program*). A primeira fase do programa foi estabelecida em outubro de 1989, usando um número de amostras de 53 veículos e testando 29 diferentes combustíveis, totalizando mais de 2.200 testes de emissões (MCCABE, 1993). No ano de 1990, a frota americana de veículos de passageiros ultrapassava os 130 milhões de unidades (FHWA, 2015) e os veículos testados compreendiam amostras de modelos da frota considerada atual na época (ano de 1989/90) e de veículos entre 1983-85 (CHOCK et al., 1995). Ao final da segunda fase do programa o número de testes de emissões ultrapassava 3.000 ensaios (DUNKER et al., 1996).

Segundo Vicentini (2011), as principais propriedades avaliadas nos combustíveis durante o programa *Auto Oil* americano foram: temperaturas de evaporados (T50% e T90%), pressão de vapor Reid (PVR), teores de enxofre, aromáticos, olefinas e oxigenados. As temperaturas T50% e T90% se referem à temperatura que o combustível tem, respectivamente, em 50 e 90% de seu volume evaporado. A pressão de vapor Reid é a pressão absoluta exercida pelos gases evaporados do combustível à temperatura de 37,8 °C, conforme norma ASTM D6378-10. Os teores de aromáticos e olefinas influem na emissão de compostos orgânicos com potencial de formação de ozônio. O combustível oxigenado adicionado durante o programa de testes foi o metanol.

Uma síntese dos resultados das emissões de CO, NO<sub>x</sub>, HC e de autonomia de combustível da primeira fase do programa americano é apresentada na TABELA 2, onde é possível observarem-se as alterações nas emissões com a variação na

composição dos combustíveis testados e interação com as tecnologias dos veículos utilizados.

Um dos principais objetivos do programa *Auto Oil* dos Estados Unidos foi obter dados para subsidiar a reformulação da gasolina americana com base nas emissões automotivas e projeções do impacto das formulações na formação de ozônio. Os dados gerados pelo programa subsidiaram dezenas de publicações científicas sobre emissões de ozônio, modelos de qualidade do ar e emissões automotivas, além de influenciar as próximas etapas da legislação americana de controle de poluentes.

TABELA 2 – PRIMEIRA FASE DO PROGRAMA *AUTO OIL* NOS EUA

Variação de parâmetros	Frota	CO	NO <sub>x</sub>	HC	Economia de combustível
Redução de aromáticos (45→20%)	Nova	↓ 13%	- <sup>1</sup>	↓ 14%	↓ 1-3%
	Velha	- <sup>1</sup>	↓ 11%	↑ 6%	
Aumento de MTBE (0→15%)	Nova	↓ 14%	<sup>2</sup>	↓ 5%	↓ 1-2%
	Velha	↓ 11%	<sup>2</sup>	↓ 9%	
Redução de olefinas (0→15%)	Nova	- <sup>1</sup>	↓ 6%	↑ 6%	↓ <0,5%
	Velha	- <sup>1</sup>	↓ 6%	↑ 6%	
Redução da T90% (182→138°C)	Nova	- <sup>1</sup>	↑ 5%	↓ 22% <sup>3</sup>	↓ 1,5%
	Velha	↑ 14%	- <sup>1</sup>	↓ 6%	
Redução de teor de enxofre (450→50 ppmv)	Nova	↓ 19%	↓ 8%	↓ 18%	SES <sup>1</sup>
	Velha				
Redução de Vapor Reid <sup>4</sup> (9→8 psi)	Nova	↓ 9%	- <sup>1</sup>	↓ 4%	SES <sup>1</sup>
	Velha				
Uso de metanol (0→85%)	Nova	↓ 31%	↑ 23%	↓ 37% <sup>5</sup>	Não informado
	Velha				

FONTE: Adaptado de LEGGE (1997).

NOTAS: <sup>1</sup> – sem efeito significativo; <sup>2</sup> – sem efeito quando os aromáticos são reduzidos, com seu acréscimo as emissões sobem 5%; <sup>3</sup> – o aumento do teor de aromáticos influi na T90%, levando a uma redução das emissões de compostos orgânicos voláteis quando T90% decresce; <sup>4</sup> – a redução da pressão de vapor Reid reduz em 34% as emissões evaporativas; <sup>5</sup> – hidrocarbonetos orgânicos equivalentes.

A análise estatística dos dados gerados durante o programa *Auto Oil* americano foi baseada em planejamento fatorial de dois níveis. Os métodos de análise utilizados incluíram a detecção dos valores *outliers*, a análise de variância

(ANOVA), análise de covariância e a análise de regressão. Tais métodos baseiam-se no princípio dos mínimos quadrados, em que, para o modelo a ser ajustado aos dados, os efeitos do modelo são estimados de modo a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e o modelo ajustado (PAINTER; RUTHERFORD, 1992).

A Europa lançou seu programa *Auto Oil* em 1992, dois anos após o programa americano, aproveitando as experiências desse. O programa europeu foi chamado de EPEFE (*The European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technology*). O EPEFE realizou mais de 2.000 testes em 16 veículos leves de passageiros do ciclo Otto utilizando 12 diferentes composições de gasolinas; para o ciclo Diesel foram usados 19 veículos leves e cinco motores pesados com 11 diferentes combustíveis. A frota de veículos selecionados para ensaios pelo programa europeu teve uma abordagem diferente do programa americano, pois foram utilizados veículos protótipos e com sistemas de controle de emissões avançados. O principal objetivo do uso desses veículos foi de projetar cenários das emissões futuras com uso de novas composições de combustíveis em novas tecnologias automotivas (RIPPON, 1996; LEGGE, 1997).

As propriedades avaliadas nos combustíveis utilizados no programa foram: teor de aromáticos; volume evaporado a 100 °C (E100) e teor de enxofre para as gasolinas e a redução da densidade; redução de poliaromáticos; aumento do número de cetano e redução da T95% para o óleo diesel.

A TABELA 3 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos no programa de ensaios EPEFE, onde é possível observar as alterações ocasionadas nas emissões com uso de diferentes compostos nos combustíveis ensaiados.

O programa *Auto Oil* europeu - EPEFE proporcionou, além de subsídios para reformulação dos combustíveis e legislação, o desenvolvimento de conhecimento e diversas publicações sobre emissões veiculares (GREENING, 2001).

Para tratamento dos dados obtidos durante os ensaios, utilizaram-se técnicas estatísticas para avaliação dos resultados, baseando-se na análise fatorial, detecção de *outliers*, análise de variância (ANOVA) e modelos de regressão (ZEMROCH et al., 1996).

TABELA 3 – PRINCIPAIS RESULTADOS DO PROGRAMA EPEFE

Varição de parâmetros	CO	HC	NO <sub>x</sub>	MP
Enxofre 382→18 ppmv (gasolina)	↓ 9%	↓ 9%	↓ 10%	n.a. <sup>1</sup>
Aromáticos 50→20% e evaporados (E100) de 65% (gasolina)	↓ 17%	↓ 10%	↑ 3%	n.a. <sup>1</sup>
Aromáticos 50→20% e evaporados (E100) de 65% (gasolina)			↑ 8%	n.a. <sup>1</sup>
Aromáticos 50→20% e evaporados (E100) de 65% (gasolina)		↓ 32%	↑ 15%	n.a. <sup>1</sup>
densidade 0,855→0,828 kg l <sup>-1</sup> veículos diesel leves motor diesel pesado	↓ 17% ↑ 5%	↓ 19% ↑ 14%	↑ 1% ↓ 4%	↓ 19% SES <sup>2</sup>
Varição de parâmetros	CO	HC	NO <sub>x</sub>	MP
Poliaromáticos 8→1% veículos diesel leves motor diesel pesado	↑ 4% SES <sup>2</sup>	↑ 6% ↓ 4%	↓ 3% ↓ 2%	↓ 5% ↓ 4%
Número de Cetano 50→58 veículos diesel leves motor diesel pesado	↓ 25% ↓ 10%	↓ 26% ↓ 6%	SES <sup>2</sup> SES <sup>2</sup>	↑ 5% SES <sup>2</sup>
T95% 370→325°C veículos diesel leves motor diesel pesado	SES <sup>2</sup> ↑ 7%	SES <sup>2</sup> ↑ 13%	↑ 5% ↓ 2%	↓ 7% SES <sup>2</sup>

FONTE: Adaptado de ZEMROCH et al. (1996).

NOTAS: <sup>1</sup> – não aplicável para veículos do ciclo Otto; <sup>2</sup> – sem efeito significativo.

México e Japão também desenvolveram seus programas baseados no programa *Auto Oil*. No México, o início dos experimentos se deu em 2001, objetivando a reformulação dos combustíveis para o ano de 2006, data em que entrariam em vigor novos limites de emissões para os veículos automotores a serem homologados. Foram realizados experimentos com 15 diferentes composições de gasolinas, com objetivo de verificar o impacto de alteração nos seguintes parâmetros: RVP, aromáticos, olefinas, teor de enxofre e de combustíveis oxigenados (MTBE e etanol). A amostra de veículos ensaiados foi composta por trinta carros da frota em circulação. A TABELA 4 apresenta de forma resumida os principais resultados obtidos para as emissões de HC, CO e NO<sub>x</sub> durante as pesquisas desenvolvidas pelo programa mexicano de ensaios, visando entender as implicações causadas por alterações em sua matriz de combustíveis.

Os procedimentos para análise estatística dos dados do programa mexicano de ensaios basearam-se nas ferramentas usadas pelo *Auto Oil* americano (SCHIFTER et al., 2004).

TABELA 4 – RESULTADOS DO PROGRAMA AUTO OIL MEXICANO

Variação de parâmetros	CO	HC	NO <sub>x</sub>
Adição de oxigenado (MTBE – 2%)	↓	↓	SES <sup>1</sup>
Adição de oxigenado (Etanol – 2%)	↓	↓	SES <sup>1</sup>
Variação de parâmetros	CO	HC	NO <sub>x</sub>
Redução do RVP	↓	↓	SES <sup>1</sup>
Redução do teor de aromáticos	↓	SES <sup>1</sup>	SES <sup>1</sup>
Redução do teor de olefinas	↓	SES <sup>1</sup>	↓
Redução do teor de enxofre	↓	↓	↓

FONTE: Adaptado de SCHIFTER et al. (2004).

NOTA: <sup>1</sup> – sem efeito significativo.

O Japão desenvolveu seu programa baseado nos moldes americano e europeu, sendo que sua versão do programa se chamou JCAP (*Japan Clean Air Programm*). O programa contou com agentes do governo e indústrias do petróleo e automotivas, tendo a fase JCAP I ocorrido entre 1997 e 2001 e a fase JCAP II entre 2002 e 2007. A primeira fase visou identificar futuras tecnologias automotivas e de combustíveis para melhorar a qualidade do ar, quantificar esses ganhos e os custos para implantação dessas melhorias. A segunda fase do programa teve como objetivos desenvolver tecnologias e combustíveis com baixas emissões e consumo de combustível, desenvolver modelos de qualidade do ar condizentes com mundo real, pesquisar emissões não regulamentadas e de nano partículas em veículos (MISONO, 2004; YOSHIKAWA et al., 2008). Em sua terceira fase mudou a designação para JATOP (*Japan Auto-Oil Program*), continuando seus estudos de emissões veiculares, incluindo em seu escopo estudos com biocombustíveis (etanol e biodiesel) (FUKUDA et al., 2008; HIROSE et al., 2011).

No Brasil, no ano de 2012, teve início o planejamento da versão nacional do programa *Auto Oil*, chamado de PCVE - Programa Brasileiro de Combustíveis, Tecnologias Veiculares e Emissões (IBAMA, 2016). Com base na frota de veículos do ano de 2011 foram selecionados veículos em uso para compor uma matriz de amostras a serem testadas com diversos combustíveis. A matriz de veículos incluiu, além de representantes da frota de circulantes no ano de 2011, novos veículos das fases do PROCONVE e PROMOT, que seriam implantadas a partir de 2012 e 2014. O planejamento amostral totalizou a seleção de 54 veículos leves, 22 motocicletas e 9 motores pesados do ciclo Diesel.

Os combustíveis testados incluem formulações já utilizadas no mercado brasileiro e novas formulações, visando à pesquisa de seus efeitos sobre as emissões em veículos da frota em seus vários níveis tecnológicos. As principais características avaliadas em 18 diferentes combustíveis foram: teor de enxofre, teor de biocombustível (etanol e biodiesel), uso de etanol hidratado e anidro e adição de ETBE (éter etil terc-butilico) – aditivo oxigenado com propriedades semelhantes ao etanol (MENEZES et al., 2006).

O principal objetivo do programa foi o desenvolvimento de modelos de dispersão de poluentes, levando-se em consideração os dados da frota circulante com diversas tecnologias existentes e suas consequências e o uso de diferentes composições de combustíveis e seus impactos na qualidade do ar.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os procedimentos de ensaios empregados bem como as análises efetuadas na determinação das emissões em estudo, citando-se as ferramentas utilizadas no tratamento e interpretação dos resultados. Ainda, abordam-se as premissas adotadas para a determinação dos cenários a serem apresentados com uso dos fatores de emissões estimados. Os processos de verificação e calibração dos equipamentos durante a realização dos ensaios são citados ao final do capítulo.

#### 3.1 DELINEAMENTO DE ENSAIOS

A seleção das amostras para os experimentos buscou cobrir os veículos automotores da frota brasileira, sendo a amostragem dividida conforme fases do PROCONVE, que além de classificar os veículos e períodos de vigência de cada fase de regulamentação, determinou os procedimentos para realização dos ensaios de emissões. Esta pesquisa utilizou esses mesmos parâmetros para classificar e ensaiar as amostras testadas, além de técnicas não normalizadas para determinar compostos ainda não legislados em algumas categorias de veículos. A TABELA 5 apresenta as categorias das amostras que foram usadas na presente pesquisa, bem como suas características e os métodos de ensaios e análises utilizados.

TABELA 5 – METODOLOGIAS DE ENSAIOS E ANÁLISES

<b>Categorias das amostras</b>	<b>Ciclo motor</b>	<b>Método ensaio</b>	<b>Análises</b>
Veículos de passageiros	Otto	Dinamômetro chassi/ AVC <sup>1</sup>	Regulamentadas, aldeídos, ANQ, FTIR <sup>2</sup> , NMHC <sup>3</sup> , CH <sub>4</sub> <sup>3</sup>
Motociclos	Otto	Dinamômetro chassi/ AVC <sup>1</sup>	Regulamentadas, aldeídos <sup>2</sup> , ANQ <sup>2</sup> , FTIR <sup>2</sup> , NMHC <sup>3</sup> , CH <sub>4</sub> <sup>3</sup>

FONTE: O autor (2017).

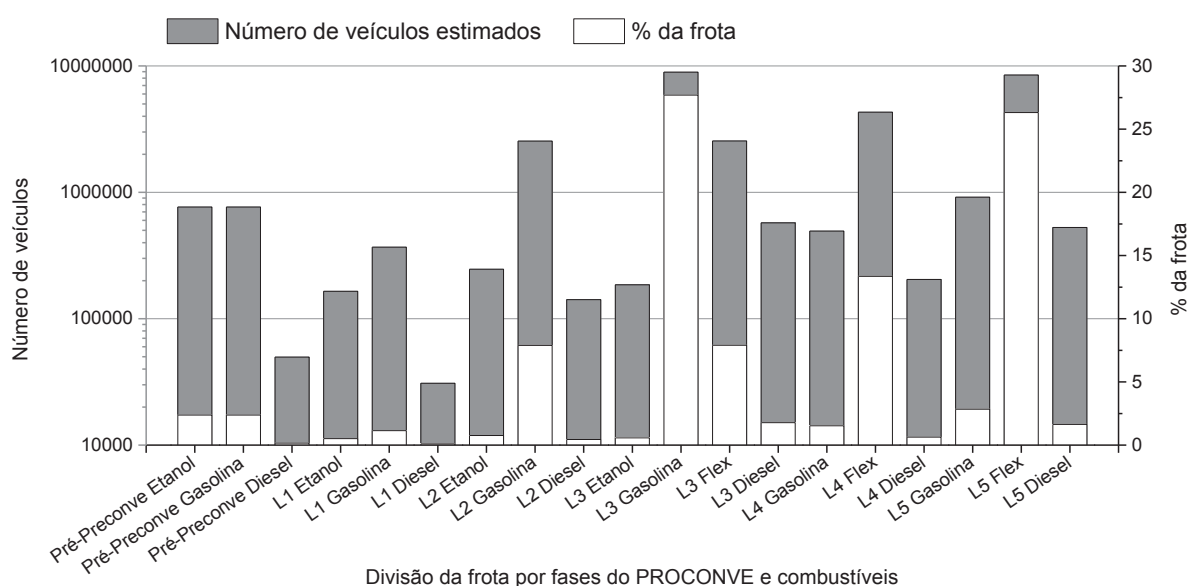
NOTAS: <sup>1</sup> – Amostrador de volume constante; análises regulamentadas englobam as emissões de THC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>; <sup>2</sup> – Análise de compostos não regulamentados para a categoria de veículos; <sup>3</sup> – NMHC e CH<sub>4</sub> em veículos de passageiros e comerciais leves, regulamentados após fase L4; em motociclos são emissões não regulamentadas.

A seleção das amostras foi baseada na distribuição dos veículos em cada fase do PROCONVE, de acordo com o inventário nacional de emissões e dados

quantitativos da representatividade por modelo de cada veículo comercializado durante as fases do PROCONVE – dados esses provenientes de uma consultoria automotiva especializada (FRAGA SYSTEM, 2012). O ano base de composição da frota utilizada foi 2011, pois o planejamento dos experimentos foi realizado no ano de 2013, e não havia uma base de dados consolidada para o ano de 2012. Foram previstas amostras de novas etapas a serem implantadas pelo CONAMA, sendo essas a fase L6 (2014) para os automóveis e M4 (2014) para os motocicletas.

A FIGURA 7 apresenta a estimativa do cenário da frota brasileira de automóveis leves de passageiros e comerciais leves Diesel para o ano de 2011 e a porcentagem de cada categoria em função da frota total, estimada em 32.227.789 unidades para essas categorias de veículos.

FIGURA 7 – ESTIMATIVA DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES EM 2011



Divisão da frota por fases do PROCONVE e combustíveis

FONTE: FRAGA SYSTEM (2012)

Com as informações da composição da frota e fases do PROCONVE foram distribuídas as amostras visando abranger as classes e tipos de veículos com maior representatividade na frota. Incluíram-se no programa de ensaios veículos considerados alto emissores, ou seja, veículos que não seriam aprovados em um ensaio de inspeção veicular tradicional (BRASIL, 2009). O objetivo foi conhecer o perfil de emissões desses veículos e utilizar as informações, no caso dos veículos sem uso de catalisador, para compor os fatores de emissões.

A TABELA 6 apresenta a distribuição da frota de veículos leves de passageiros nas fases do PROCONVE, sua representatividade e a distribuição das amostras ensaiadas no programa de testes.

TABELA 6 – DISTRIBUIÇÃO DA FROTA E AMOSTRAS NAS FASES DO PROCONVE

Ano <sup>1</sup>	Fase Proconve/ combustível	Frota (2011)	% frota	% por Fase Proconve	Nº amostras	% amostras	% amostras por fase Proconve
<1988	Pré-Proconve etanol	764.377	2%	4%	3	6%	10%
	Pré-Proconve gasolina	765.742	2%		2	4%	
1988/91	L1 etanol	164.832	1%	2%	0	0%	3%
	L1 gasolina	367.930	1%		2	4%	
1992/96	L2 etanol	246.247	1%	9%	0	0%	5%
	L2 gasolina	2.542.988	8%		3	6%	
1997/04	L3 etanol	185.421	1%	38%	0	0%	22%
	L3 gasolina	8.924.392	29%		8	16%	
	L3 flex	2.546.320	8%		3	6%	
2005/08	L4 gasolina	493.816	2%	16%	3	4%	20%
	L4 flex	4.302.712	14%		5	12%	
2009/13	L5 gasolina	915.515	3%	31%	2	4%	27%
	L5 flex	8.481.197	28%		11	22%	
>2014	L6 gasolina	0	0,0%	0%	2	4%	14%
	L6 flex	0	0,0%		5	10%	
Total		30.701.789	100%	100%	49	100%	100%

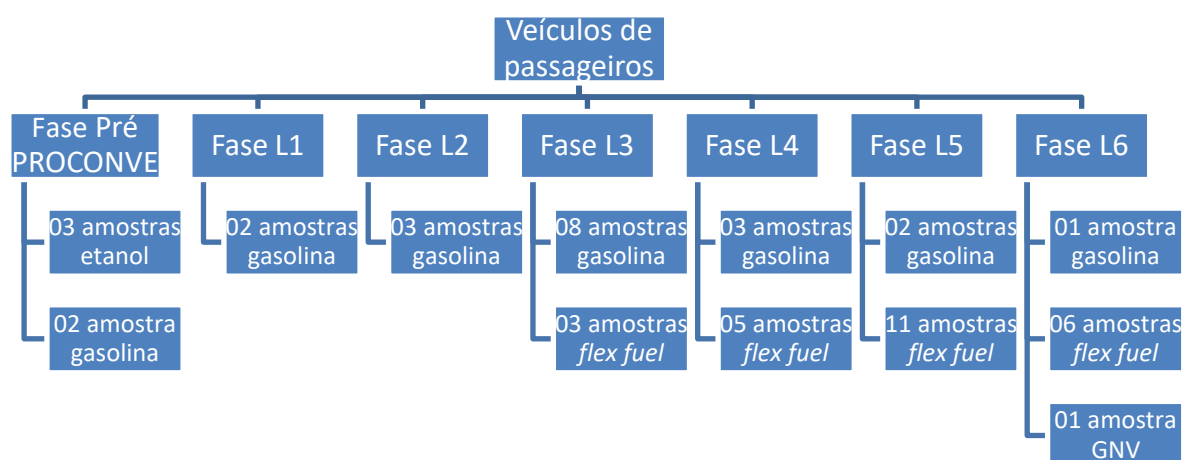
FONTE: O autor (2017).

NOTA: <sup>1</sup> – Ano se refere ao período de vigência de cada fase do PROCONVE.

O planejamento inicial previa um total de 44 amostras, sendo que durante a realização dos trabalhos foram efetuadas mudanças no planejamento experimental e o total de amostras ensaiadas passou para 49 veículos. A alteração no número de amostras visou ampliar os resultados de ensaios para determinação dos fatores de emissão, porém houve uma redução no número de combustíveis testados.

A FIGURA 8 apresenta a matriz de distribuição das fases do PROCONVE e das amostras de veículos leves de passageiros do ciclo Otto estudadas.

FIGURA 8 – MATRIZ DE AMOSTRAS EM VEÍCULOS LEVES



FONTE: O autor (2017).

Na TABELA 7, pode-se observar a composição da frota de motocicletas estimada para o ano de 2011 (FRAGA SYSTEM, 2012), sua distribuição nas fases do PROMOT e o número de amostras ensaiadas para os fins desta pesquisa.

TABELA 7 – DISTRIBUIÇÃO DA FROTA E AMOSTRAS NAS FASES DO PROMOT

Fase Promot/ combustível/ Ano <sup>1</sup>	Frota (2011)	% frota	% por Fase Promot	Nº amostras	% amostras	% amostras por fase Promot
Pré-Promot/ gasolina/ < 2003	1.903.209	15,2%	15%	3	11,5%	12%
M1 gasolina/ 2003/04	1.079.530	8,6%	9%	4	15,4%	15%
M2 gasolina/ 2005/08	4.440.236	35,4%	35%	4	15,4%	15%
M3 gasolina/ 2009/13	4.110.452	32,7%	41%	8	30,8%	50%
M3 flex/ 2009/13	1.023.129	8,1%		5	19,2%	
M4 gasolina/ 2014/16	0	0%	0%	0	0%	8%
M4 flex/ 2014/16	0	0%		2	7,7%	
Total	12.556.557	100%	100%	26	100%	100%

FONTE: O autor (2017).

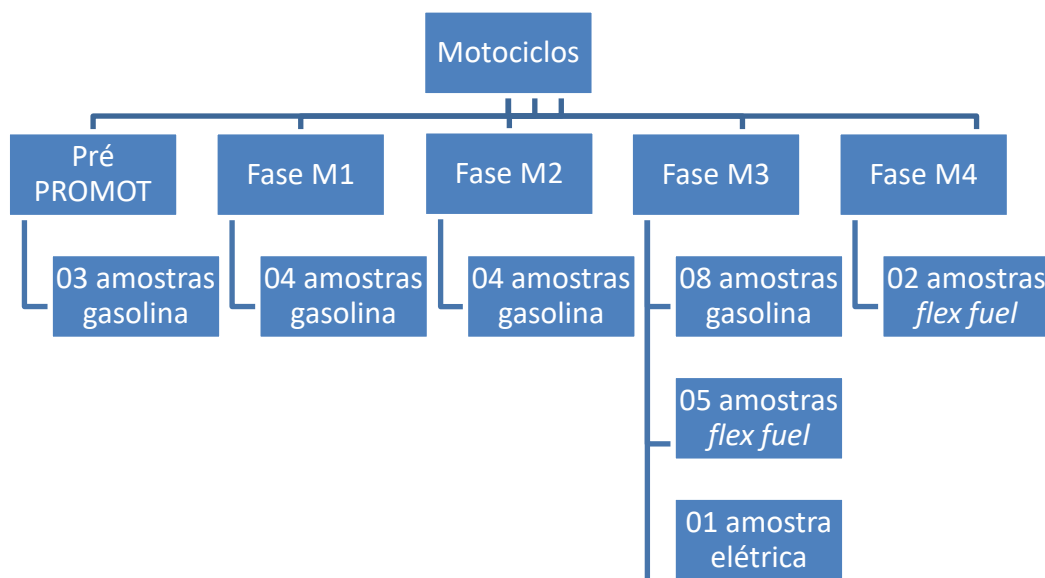
NOTA: <sup>1</sup> – Ano se refere a cada período de vigência do PROMOT.

O planejamento experimental para os ensaios em motocicletas também apresentou mudanças durante a execução dos trabalhos, sendo que, inicialmente,

estava previsto o uso de 22 amostras e, após o desenvolvimento das atividades, esse número foi ampliado para 26.

A FIGURA 9 apresenta a matriz de motocicletas empregados nos ensaios de emissões deste estudo. Observa-se a inclusão de um exemplar de motociclo elétrico para estudos de eficiência energética.

FIGURA 9 – MATRIZ DE AMOSTRAS EM MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).

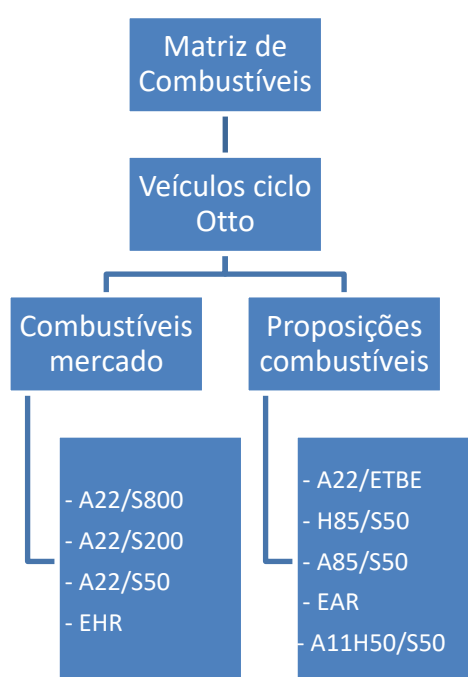
No APÊNDICE 4 apresentam-se as características básicas das amostras selecionadas para o programa de ensaios, descrevendo-se o ano de fabricação, quilometragem acumulada na ocasião dos ensaios, capacidade volumétrica do motor, combustível, entre outras. Com essas informações é possível verificar o perfil das amostras utilizadas nos experimentos, que selecionou veículos mais representativos em vendas de cada fase do PROCONVE.

Os combustíveis empregados no plano de ensaios buscaram abranger as últimas especificações comercializadas no Brasil, bem como sugestões de formulações para avaliação do desempenho e emissões das amostras. Na FIGURA 10, pode-se observar a composição da matriz de combustíveis empregados nos ensaios de emissões e, ainda, a divisão entre combustíveis já comercializados e novas proposições.

A nomenclatura dos combustíveis seguiu os preceitos da NBR 8689 (ABNT, 2012b), sendo que:

- “A” significa uso de etanol anidro na mistura (ex. A22: gasolina contendo 22%, em volume, de etanol anidro);
- “H” significa o uso de etanol hidratado na mistura (ex. H85: mistura de 85% de etanol hidratado e 15% de gasolina, em volume);
- “S” representa o teor máximo, em concentração, de enxofre no combustível (ex. A22/S50: combustível contendo um teor máximo de 50 ppmv de enxofre);
- EAR e EHR se referem, respectivamente, ao etanol anidro e hidratado de referência.

FIGURA 10 – MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS

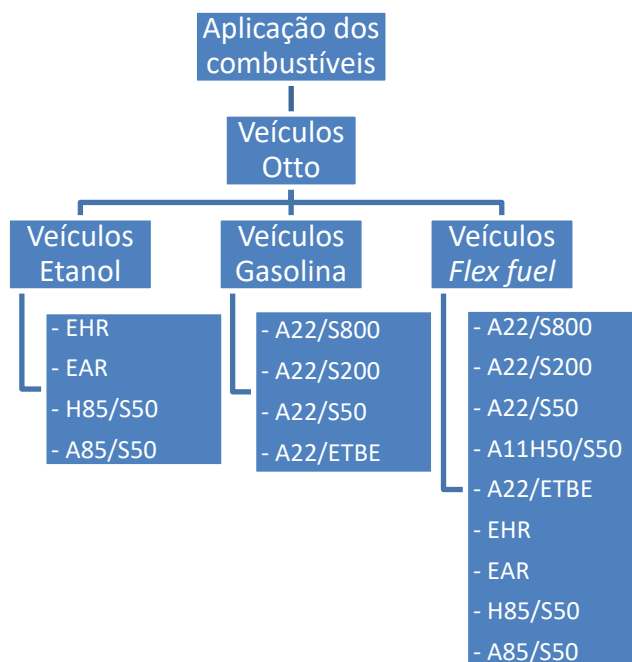


FONTE: O autor (2017).

No APÊNDICE 5 mostram-se as principais características e propriedades dos combustíveis empregados nos testes desta pesquisa, com informações sobre os teores de etanol, água, enxofre, gasolina além do poder calorífico e densidade.

A FIGURA 11 apresenta, de acordo com o tipo de operação dos motores das amostras, como ocorreu a distribuição dos combustíveis utilizados nos experimentos. É evidenciada a divisão de tipos de combustíveis englobados nos motores de ciclo Otto, que podem ser dedicados a etanol, a gasolina ou possuir tecnologia *flex fuel*.

FIGURA 11 – APLICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS NAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2017).

Para distribuição dos combustíveis nos ensaios das amostras estava previsto inicialmente o planejamento fatorial completo, onde todas as amostras seriam ensaiadas com todos os combustíveis do programa, com exceção dos veículos das fases L6, M4 que não executariam ensaios com o combustível de maior teor de enxofre, sendo esse combustível o A22/S800 – questão justificada pelo fato de que, na implantação dessas fases, esses combustíveis já não estarem disponíveis no mercado, além de os sistemas de pós-tratamento dessas tecnologias possuírem sensibilidade ao teor de enxofre do combustível. Porém, devido ao aumento do número de amostras previstas e à necessidade de readequar o número total de ensaios à disponibilidade do laboratório, combustíveis e tempo para uso das amostras, não foi possível empregar o planejamento fatorial completo. Na FIGURA 14 é possível observar as amostras em que foi empregado o planejamento fatorial completo. As principais mudanças no planejamento experimental foram:

- Veículos leves: inclusão de um veículo alto emissor na fase Pré-PROCONVE; retirada de uma amostra da fase L2/G; inclusão de cinco veículos com mesmo ano/modelo de outros já existentes na matriz, com objetivo de verificar similaridade das amostras; troca de um veículo L6 gasolina por um *flex fuel*;

- Motociclos: inclusão de quatro amostras; realização de quatro repetições nos ensaios com A22-S50.

Com a ampliação do número de ensaios e amostras concentradas no uso de gasolina A22-S50 e EHR, buscou-se ampliar a obtenção dos dados usados na estimativa dos fatores de emissão.

Os ensaios de emissões em todas as amostras e combustíveis foram realizados em triplicata, permitindo assim a estimativa do erro experimental associado à determinação e uma resposta individual.

As análises de ANQ, nos veículos do ciclo Otto, foram realizadas nos combustíveis com teor de etanol acima de 50%. Observe-se na matriz de combustíveis disponíveis que, abaixo desse teor de etanol, foram ensaiadas apenas as gasolinas A22, sendo que com esse teor de etanol as emissões de ANQ não são significativas (SILVA, K. C. C. et al., 2014c). O uso da técnica FTIR para mensuração das emissões não regulamentadas ocorreu em um ensaio de cada combustível para todas as amostras.

A análise fatorial contou com três níveis de fatores principais de entrada, sendo eles:  $F_1$  – Tipo de motor da amostra;  $F_2$  – Fase do PROCONVE englobando as tecnologias e  $F_3$  – Combustíveis a serem testados;

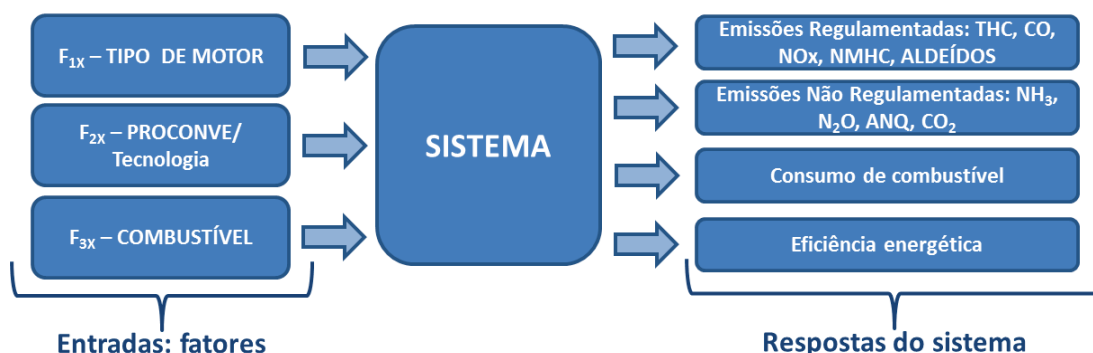
As respostas do sistema são as emissões regulamentadas e não regulamentadas, o consumo de combustível e a eficiência energética. O sistema envolve todas as interações entre os processos de combustão, ciclos de ensaios, combustíveis, tecnologias automotivas e sistemas de pós-tratamento, além do desgaste das amostras.

A FIGURA 12 ilustra os fatores de entrada de um sistema envolvendo utilização de veículo automotor, dividido em: tipo de motor, fases do PROCONVE que englobam as tecnologias usadas, tipo de combustível e as respostas de saída, sendo foco desta pesquisa as emissões legisladas e não legisladas.

O sistema que envolve a interação entre os fatores de entrada pode ser considerado como uma função desconhecida, ligando os fatores (variáveis de entrada) e as respostas (variáveis de saída) (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS et al., 1995).



FIGURA 12 – FATORES DE ENTRADA E RESPOSTAS DO SISTEMA



FONTE: O autor (2017).

Cada fator de entrada possui diferentes níveis, como descrito a seguir:

- Fator tipo do motor da amostra (F1.X) – possui três níveis, sendo: F1.1 – para Otto Etanol, F1.2 – para Otto Gasolina e F1.3 – para Otto *Flex fuel*.
- Fator fase do PROCONVE/Tecnologia (F2.X) – para os veículos leves de passageiros, possui sete níveis, correspondentes a cada fase do programa (F2.1 – Pré-PROCONVE; F2.2 – L1; F2.3 – L2; F2.4 – L3; F2.5 – L4; F2.6 – L5; F2.7 – L6); para os motocicletas cinco níveis (F2.11 – PM; F2.12 – M1; F2.13 – M2; F2.14 – M3; F2.15 – M4).
- Fator combustível (F3.X): possui nove níveis, conforme os combustíveis apresentados na FIGURA 11, porém sua combinação com os demais fatores depende diretamente do tipo de motor da amostra (fator F1).

A TABELA 8 exemplifica a combinação dos fatores para um veículo etanol (F1.1) com os fatores F2.1 e F3.X possíveis. Observa-se que para essa combinação os fatores F1.1 e F2.1 possuem apenas um nível e o fator F3.X possui quatro níveis, correspondente aos combustíveis a serem utilizados, gerando, assim, com a realização das três repetições, doze ensaios.

TABELA 8 – COMBINAÇÃO DE FATORES F1, F2 E F3 EM VEÍCULO ETANOL

Combinação	Fator F1	Fator F2	Fator F3
1	F1.1	F2.1	F3.1
2	F1.1	F2.1	F3.2
3	F1.1	F2.1	F3.3
4	F1.1	F2.1	F3.4

FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 13 e a FIGURA 14 representam como ocorreu a distribuição das análises entre os fatores F1 e F3. Na FIGURA 14 é possível verificar a distribuição

dos ensaios entre todos os fatores de entrada, usando uma codificação diferenciada para simplificar os arranjos.

A FIGURA 13 apresenta como foram realizados os experimentos de acordo com o tipo de combustível das amostras de motocicletas e veículos leves de passageiros e as análises realizadas. Na matriz, as células em branco representam combinações entre amostra e combustíveis não realizadas por impossibilidade técnica e o algarismo representa o número de repetições realizadas.

FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE COMBUSTÍVEL E ANÁLISES REALIZADAS

		Fator Combustíveis (ciclo Otto)								
Fator tipo de motor (amostras do ciclo Otto)	Análises	A22-S800	A22-S200	A22-S50	A22-ETBE	A11H50/S200	H85/S50	A85/S50	EHR	EAR
Veículo leve etanol	Emissões regulamentadas						3	3	3	3
	Emissão de aldeídos						3	3	3	3
	Emissão de ANQ						3	3	3	3
	FTIR						1	1	1	1
Veículo leve gasolina	Emissões regulamentadas	3	3	3	3					
	Emissão de aldeídos	3	3	3	3					
	Emissão de ANQ									
	FTIR	1	1	1	1					
Veículo leve <i>flex fuel</i>	Emissões regulamentadas	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Emissão de aldeídos	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Emissão de ANQ					3	3	3	3	3
	FTIR	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Motociclo gasolina	Emissões regulamentadas	3	3	3	3					
	Emissão de aldeídos	3	3	3	3					
	Emissão de ANQ									
	FTIR	1	1	1	1					
Motociclo <i>flex fuel</i>	Emissões regulamentadas	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Emissão de aldeídos	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Emissão de ANQ					3	3	3	3	3
	FTIR	1	1	1	1	1	1	1	1	1

FONTE: O autor (2017).

Para simplificar a demonstração do arranjo experimental, as amostras foram divididas em grupos, de acordo com a fase do PROCONVE a que pertenciam, e codificadas, usando um conjunto de dois algarismos para identificação da fase do PROCONVE a que pertenciam (fator F<sub>2</sub>) (PP – Pré-PROCONVE em veículo e PM pré PROMOT para motocicletas, L1 – fase 1 do PROCONVE, M1 para motocicletas da

fase 1, e assim sucessivamente). A esse primeiro grupo, quando pertinente, adicionaram-se as letras HE para demonstrar que a amostra pertencia ao grupo de alto emissor (veículo que na ocasião não atendia aos limites de emissão da inspeção veicular).

Na sequência foi adicionado um hífen separador e letras para identificar o combustível do veículo (fator  $F_1$ ), sendo: E – veículo movido a etanol; G – veículo movido a gasolina, F – veículo *flex fuel*, T – veículo *tetra-fuel* (*flex* e GNV) e GNV – veículo movido a gás natural veicular.

A FIGURA 14 apresenta como se deu a combinação de ensaios entre os combustíveis, análises e amostras ensaiadas. Os algarismos no interior das células indicam o número de repetições que cada amostra realizou, as células em branco são combinações não realizadas.

Além dos ensaios da matriz descrita foram executados ensaios adicionais para verificação das emissões antes do catalisador e uso de catalisadores com diferentes acúmulos de quilometragem, outros teores de etanol para verificação do comportamento da relação NMHC/THC, num total de 70. O total de análises executadas foi de 3491.

Após definição do ano/modelo do veículo e de sua quilometragem, adotou-se como critério de aceite para a quilometragem acumulada a estimativa de intensidade de uso utilizada no II Inventário de Emissões do IBAMA (MMA, 2014), tabela apresentada no ANEXO 1, aplicando-se a essa uma tolerância de 20%.

Os veículos pré-selecionados passaram por um processo de inspeção das condições gerais (motor, sistema de escapamento, transmissão, pneus, alinhamento) e simulação de uma inspeção veicular de gases, conforme Resolução 418/09 (IBAMA, 2011). A inspeção preliminar de gases visou selecionar veículos que estariam aptos a transitar de acordo com a legislação atual e um sistema de inspeção atuante. Para cada fase do PROCONVE foi aceita uma amostra com limites de emissões acima dos estipulados pela legislação, com objetivo de verificar a influência desses veículos nas emissões gerais. Os veículos selecionados foram locados para utilização nos ensaios de emissões, sendo o período mínimo planejado de utilização correspondente a uma semana para cada combustível a ser testado.

FIGURA 14 – MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS E AMOSTRAS

Matriz de relacionamento de ensaios entre amostras e combustíveis																						
Veículos leves	A22-S800	A22-S200	A22-S50	A22-ETBE	A11H50/S200	H85/S50	A85/S50	EHR	EAR	GNV	A22-S800	A22-S200	A22-S50	A22-ETBE	A11H50/S200	H85/S50	A85/S50	EHR	EAR	Veículos comerciais e motores		
PP-E-01						3	3	3	3		3	3	3	3							L3-G-01	
PP-E-02						3	3	3	3		3	3	3	3							L3-G-02	
PPHE-E-03								3			3	3	3	3							L3-G-03	
PP-G-01	3	3	3	3							3	3	3	3							L3-G-04	
PPHE-G-02		3									3	3	3	3							L3-G-05	
L1-G-01	3	3	3	3							3	3	3	3							L3-G-06	
L1HE-G-02		3										3									L3HE-G-07	
L2-G-01	3	3	3	3							3	3	3	3	3	3	3	3	3		L3-F-08	
L2-G-02	3	3	3	3							3	3	3	3							L3-G-09	
L2HE-G-03		3									3	3	3	3	3	3	3	3	3		L3-F-10	
L4-G-01	3	3	3	3									3					3			L3-F-11	
L4-G-02	3	3	3	3																	Motociclos	
L4-F-03	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	A22-S800	A22-S200	A22-S50	A22-ETBE	A11-H50/S200	H85/S50	A85/S50	EHR	EAR			
L4-F-04	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3												
L4-F-05	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3												
L4HE-F-06		3									3	3	4	3								PM-G-01
L4-F-07			3					3			3	3	4	3								PM-G-02
L4-G-08			3									3									PMHE-G-03	
L5-G-01	3	3	3	3							3	3	4	3							M1-G-01	
L5-G-02	3	3	3	3							3	3	4	3							M1-G-02	
L5-F-03	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3									M1HE-G-03	
L5-F-04	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			4								M1-G-04	
L5-F-05	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3							M2-G-01	
L5-F-06	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3							M2-G-02	
L5-F-07	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3							M2-G-03	
L5-F-08	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3											M2HE-G-04	
L5-F-09	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3							M3-G-01	
L5HE-F-10		3									3	3	4	3							M3-G-02	
L5-F-11			3						3		3	3	4	3							M3-G-03	
L5-F-12			3						3			3									M3HE-G-04	
L5-F-13	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3		M3-F-05	
L6-T-01		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3		M3-F-06	
L6-F-02		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3		M3-F-07	
L6-F-03		3	3	3	3	3	3	3	3	3			4								M3-G-08	
L6-F-04		3	3	3	3	3	3	3	3	3			4								M3-G-09	
L6-F-05		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3							M3-G-10	
L6-G-06		3	3	3							3	3	4	3							M3-G-11	
L6-G-07		3	3	3									4			3		3			M3-F-12	
L6-GNV-08										3			4			3		3			M3-F-13	
											3	3	4	3	3	3	3	3	3		M4-F-01	
											3	3	4	3	3	3	3	3	3		M4-F-02	

	Emissões	Ciclo estrada	Aldeídos	ANQ	FTIR	TOTAL
Ensaios em veículos leves	747	747	600	276	200	2570
Ensaios em motocicletas	340		318	87	106	851
Total	1087	747	918	363	306	3421

FONTE: O autor (2017).

Para realização das atividades em laboratório são necessárias informações para configuração e operacionalização dos ensaios. Para os veículos leves do ciclo Otto e Diesel, as informações básicas para configuração do ensaio são:

- Inércia do veículo para ensaio (kg);

- Coeficientes de pista para determinação e simulação da potência resistiva em dinamômetro ( $f_0$ ,  $f_1$  e  $f_2$ ), determinados conforme NBR 10.312 (ABNT, 2014). Nos casos de essas informações não estarem disponíveis, deve-se realizar os ensaios de desaceleração em pista (*coast down*), de acordo com especificações da NBR 10.312;
- Velocidades de troca de marchas (para veículos com caixa de mudanças manual), não havendo preconização do fabricante, a NBR 6601 prevê uma configuração padrão (1ª para 2ª marcha: 25 km h<sup>-1</sup>; 2ª para 3ª: 40 km h<sup>-1</sup>; 3ª para 4ª: 65 km h<sup>-1</sup>; 4ª para 5ª: 72 km h<sup>-1</sup>). Nos veículos de câmbio automático, o mesmo foi operado na condição padrão;
- Pressão de operação para os pneus.

Para os testes de motocicletas, a norma de ensaios (EC, 1997) apresenta uma tabela com as condições de carga, coeficientes  $f_0$  e  $f_2$  a serem impostos durante o teste em função da massa do motociclo.

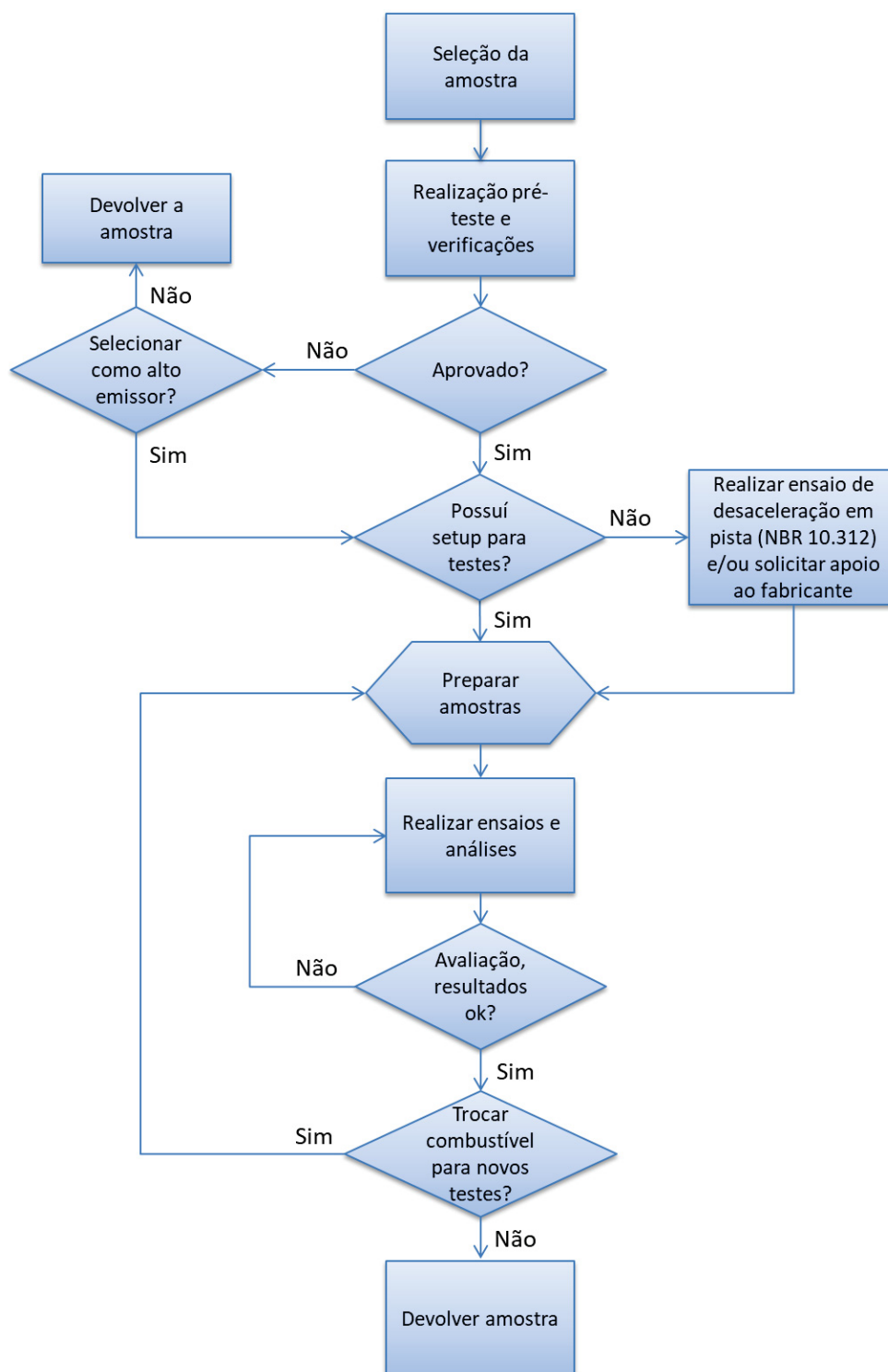
A FIGURA 15 apresenta um fluxo genérico de como foi conduzido o processo de seleção e ensaio das amostras durante o programa de testes em laboratório. O processo envolveu a seleção de amostras de acordo com sua representatividade na frota de veículos, a vistoria preliminar e um teste de inspeção para sua aprovação e condução dos testes do programa de ensaios.

Nos veículos leves e motocicletas, para as trocas de combustíveis, o tanque da amostra foi totalmente drenado e depois se realizavam duas limpezas com o próximo combustível a ser ensaiado. Entre uma limpeza e outra, o veículo tinha seu motor ligado, permanecendo por aproximadamente 10 minutos em marcha lenta. Após a limpeza, os veículos foram abastecidos definitivamente com o combustível de teste, com volume entre 25 e 30 litros, para os automóveis, e de 5 a 10 litros para os motocicletas. Ainda antes do preparo para o primeiro ensaio com novo combustível, os veículos passavam por um processo de rodagem em dinamômetro, em velocidade fixa, em uma rotação do motor de aproximadamente 3.000 RPM, por 20 minutos.

Foram previstas três repetições para cada combustível, a avaliação para o prosseguimento dos experimentos, com a troca de combustível, se deu com análise da triplicata de resultados obtidos. Para os veículos leves de passageiros e motocicletas a liberação para troca estava focada no consumo de combustível, cujo cálculo envolve os valores das emissões de CO, THC e CO<sub>2</sub> (ABNT, 2010a),

aceitando-se variações de até 3%. Nos casos em que a variação superou o limite de 3% foi executado um quarto ensaio para compor a média.

FIGURA 15 – FLUXO DAS AMOSTRAS NO PROGRAMA DE TESTES



FONTE: O autor (2017).

### 3.2 MÉTODO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES EM VEÍCULOS

Os ensaios de emissões em veículos são realizados em dinamômetro de chassi, processo que simula uma condição urbana de uso veicular. O ensaio é normalizado pela NBR 6601 (ABNT, 2012a) que é baseado no ciclo americano de condução, FTP 75 (*Federal Test Procedure*), preconizado pela EPA (Agência Norte-Americana de Meio Ambiente) (ABRANTES; ASSUNÇÃO; HIRAI, 2005). O ensaio consiste na simulação de um trajeto padronizado sobre um dinamômetro de chassi, ficando o veículo, durante o ensaio, com suas rodas propulsoras apoiadas nesse dinamômetro. O equipamento tem por finalidade produzir uma força resistiva ( $F$ ), de acordo com a equação (12):

$$F = a_0 + a_1V + a_2V^2 \quad (12)$$

de tal modo, que essa força, somada aos atritos dos pneus do veículo com dinamômetro, seja igual à força obtida conforme determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento (ABNT, 2012a, 2014), dada pela equação (13):

$$F = f_0 + f_1V + f_2V^2 \quad (13)$$

onde:

- $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  – coeficientes de dinamômetro;
- $f_0$ ,  $f_1$  e  $f_2$  – coeficientes de pista;
- $V$  – velocidade instantânea do veículo.

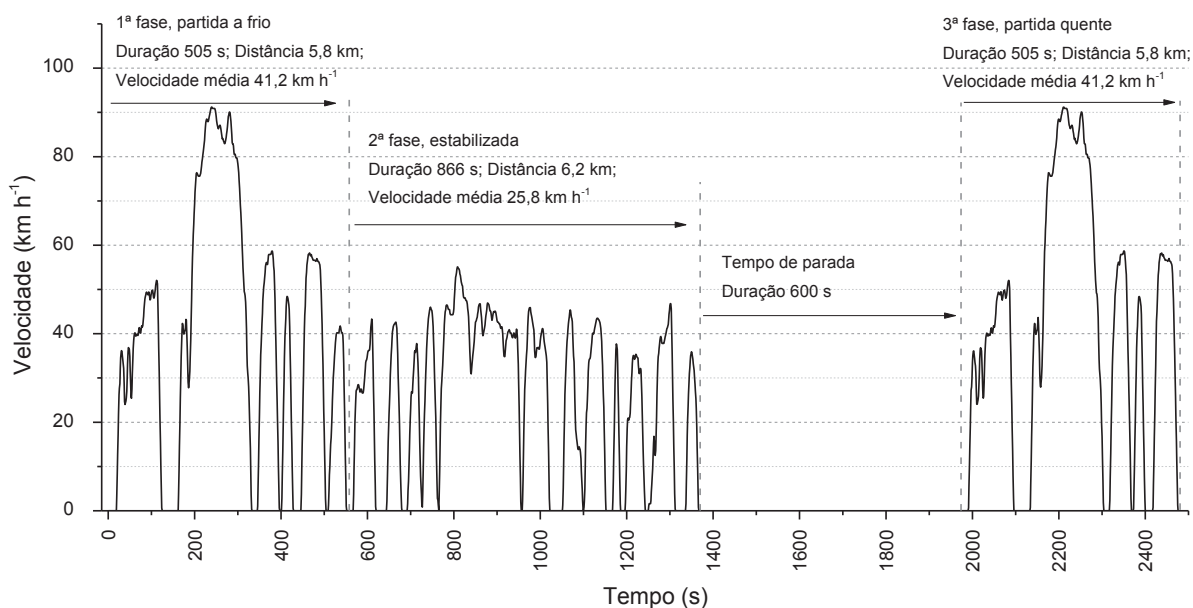
Durante o ensaio, o motor é refrigerado por intermédio de um ventilador axial com vazão máxima de  $2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , posicionado frontalmente ao veículo.

O ciclo de ensaio é composto de três fases. A primeira fase acontece com partida a frio, após um período de estabilização térmica do veículo em área com temperatura controlada entre 20 e 30°C, durante 12 a 36 horas. A fase seguinte, estabilizada, realiza-se na sequência da primeira, com duração de 866 segundos e, ao final, o veículo é desligado por dez minutos. Depois se inicia uma terceira fase com nova partida, essa a quente, sendo esse trajeto igual ao executado na primeira fase. A distância total do ciclo é de aproximadamente 18 quilômetros, com duração de 1876 segundos, excluindo-se o tempo de parada. A velocidade média

desenvolvida durante o ensaio é de  $34,2 \text{ m s}^{-1}$ , com uma aceleração positiva média de  $0,42 \text{ m s}^{-2}$  (BARLOW et al., 2009). Na FIGURA 16, pode-se observar o perfil de velocidade, em função do tempo, desenvolvida durante o ensaio de emissões.

A execução do trajeto representado na FIGURA 16 é realizada pela condução do veículo sobre o dinamômetro por um técnico, simulando o uso normal de um veículo em pista. Para os ensaios deste estudo, optou-se por utilizar, sempre que possível, o mesmo técnico na condução dos ensaios de cada amostra, reduzindo assim as influências de operação nos resultados. Durante todo o percurso, as emissões de escapamento são coletadas e diluídas em ar ambiente com uma temperatura entre 20 e  $30^\circ\text{C}$ , para evitar condensações e perdas de compostos, através de um amostrador de volume constante (AVC), que utiliza um venturi crítico para controlar e medir a vazão do sistema.

FIGURA 16 – CICLO DE CONDUÇÃO EM VEÍCULOS LEVES



FONTE: VILAR et al. (2015).

Parte desse gás, de maneira contínua, é amostrada por um segundo venturi e armazenada em sacos de tedlar®, material inerte aos compostos dos gases de escapamento. Ao final de cada fase do ciclo de emissões, a amostra integralizada de cada saco é direcionada aos detectores de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{THC}$  para sua quantificação. Antes do processo de leitura das amostras pelos detectores, esses são calibrados de forma automática com gases de referência, com um valor de fundo de escala que melhor se adapte à amostra medida. O mesmo processo de



amostragem se aplica ao ar de diluição da sala de ensaios, com objetivo de descontar possíveis contaminações da amostra.

Ao final da terceira fase, o veículo é mantido em marcha lenta, sendo coletadas informações de rotação do motor e concentração bruta de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), conforme NBR 10972 (ABNT, 2010b).

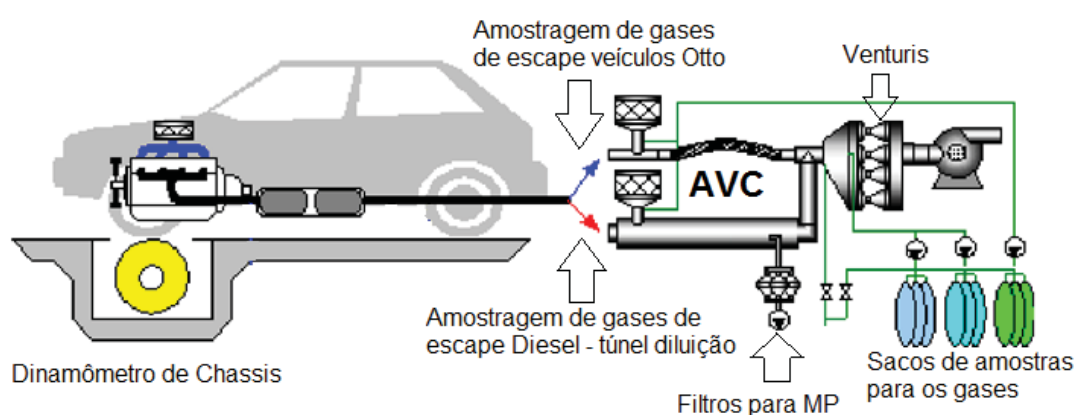
De acordo com a normativa NBR 6601, são mensurados os compostos: total de hidrocarbonetos (THC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), sendo ainda calculada a emissão de hidrocarbonetos do tipo não metano (NMHC). Para a determinação dos hidrocarbonetos não queimados são utilizados detectores de ionização por chama (FID), que se baseiam no princípio de geração de um sinal eletrônico proporcional ao número de átomos de carbono presentes na amostra, quando de sua passagem por uma câmara com chama controlada de hidrogênio. O mesmo princípio é aplicado ao metano, com a inclusão de uma coluna cromatográfica seletiva em fase gasosa antes do detector. Analisadores por absorção de raios infravermelhos não dispersivos (IND) são empregados para determinação e quantificação do monóxido e dióxido de carbono. Os analisadores IND operam baseados no fato de que uma molécula, constituída por átomos diferentes, absorve a energia infravermelha em comprimentos de onda específicos, sendo o grau de absorção proporcional à sua concentração, em pressão constante. Para a determinação dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) foram empregados analisadores por luminescência química. Seu princípio de funcionamento baseia-se na detecção de fótons provenientes de uma reação química induzida entre o óxido de nitrogênio (NO) e o ozônio (O<sub>3</sub>) em sua câmara (HORIBA, 2007; ADACHI; NAKAMURA, 2014).

Depois da quantificação dos compostos pelos detectores, sua massa é calculada, considerando-se a concentração, densidade e volume total amostrado, sendo o resultado final normalizado pela distância percorrida no teste e expresso em g km<sup>-1</sup>. O consumo de combustível durante o ciclo urbano é determinado pelo método de balanço de carbono, preconizado pela NBR 7024 (ABNT, 2010a), considerando as emissões de CO, THC e CO<sub>2</sub>, sendo expresso em km L<sup>-1</sup>.

Para os veículos comerciais do ciclo Diesel, o processo de ensaio apresenta algumas diferenças, sendo a principal a necessidade do uso de um túnel de diluição total, com fluxo turbulento para propiciar a formação do material particulado, emissão típica desse combustível. A quantificação do material particulado é

realizada por gravimetria, onde filtros são colocados ao final do túnel de diluição e recebem uma amostra de fluxo contínuo do gás de escape diluído. Ainda nessa categoria, a determinação dos hidrocarbonetos totais utiliza um detector de ionização de chama aquecido (190 °C) que realiza medições contínuas na frequência de 1 Hz durante todo o ciclo, sendo a emissão total a integral dessas observações. Na FIGURA 17 tem-se uma representação simplificada de uma sala de ensaios de emissões para veículos leves dos ciclos Otto e Diesel.

FIGURA 17 – LAYOUT SALA DE ENSAIOS EM VEÍCULOS LEVES



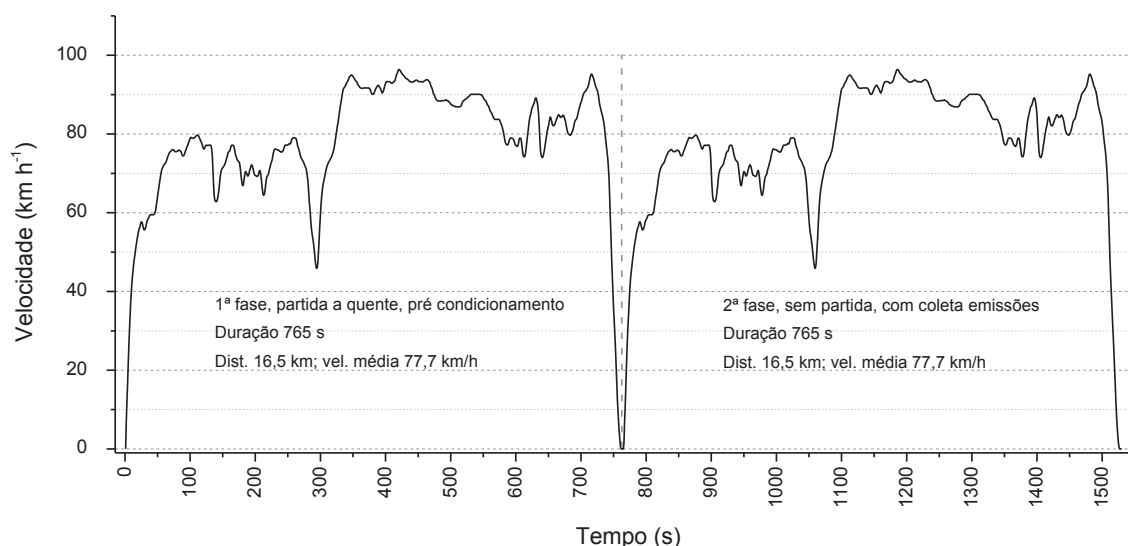
FONTE: Adaptado de AVL (2014).

Ao final do ensaio de emissões em ciclo urbano, foi conduzido o ensaio de consumo em ciclo estrada. Esse teste tem por objetivo a verificação do consumo de combustível em uma condição que simula o uso de veículo em estrada, normalizado pela NBR 7024 (ABNT, 2010a) baseado no ciclo HWFET (*Highway Fuel Economy Test*) da legislação americana (CFR, 2000). O método de ensaios e os equipamentos empregados são os mesmos utilizados no ensaio de emissões regulamentado pela NBR 6601. O ciclo a ser desenvolvido é iniciado logo após o ensaio de emissões em ciclo urbano, composto de dois trechos idênticos, sendo que o primeiro tem a finalidade de um pré-condicionamento no veículo e o segundo, a coleta das emissões. A FIGURA 18 apresenta o perfil de velocidades para execução do ensaio no ciclo estrada, cada trecho com uma distância aproximada de 16,5 km e velocidade média de 21,6 m s<sup>-1</sup>.

Durante o ensaio do ciclo estrada, além da determinação do consumo pelo método de balanço de carbono, foram mensuradas as emissões de THC, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> e NMHC. Os procedimentos de medição e cálculo das emissões nesse

ciclo seguem as mesmas premissas do ensaio de emissões do ciclo urbano, regulamentado pela NBR 6601.

FIGURA 18 – CICLO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL ESTRADA



FONTE: VILAR et al. (2015).

### 3.3 MÉTODO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES EM MOTOCICLOS

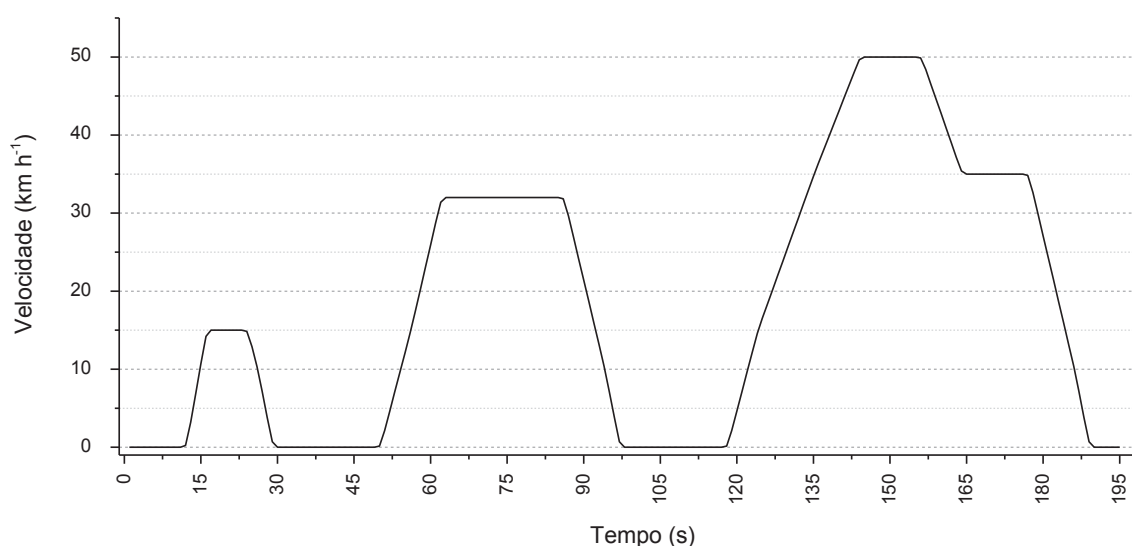
A legislação brasileira, por intermédio do PROMOT, adotou, como método de ensaios para determinação de poluentes em motocicletas, a simulação da condição de uso em dinamômetro de chassi. Para as homologações realizadas até o ano de 2015 – fases do PROMOT designadas como M1, M2 e M3 – foram empregados procedimentos de ensaio baseados na legislação europeia (BRASIL, 2002), descritos pela normativa 97/24/EC (EC, 1997), chamada de ciclo europeu. A partir dos novos modelos homologados no ano de 2014 e para todos os modelos fabricados após 2016, de acordo com a resolução CONAMA 432/13 (BRASIL, 2011), foi adotado o ciclo de condução transiente WMTC, regulamentado pela norma ECE/TRANS/180 (UN, 2005), normalizado em 2015 pela NBR 16.369 (ABNT, 2015).

Ambos os ciclos de ensaio se baseiam na condução do motociclo sobre um dinamômetro de chassi, onde o veículo é fixado de maneira que sua roda propulsora seja apoiada diretamente no equipamento. Desta forma é possível realizar simulações das cargas de pista durante a execução dos ensaios, para

desenvolvimento do produto, verificações das emissões, testes de durabilidade e engenharia final do produto.

O trajeto preestabelecido para condução dos ensaios em motocicletas das fases M1 e M2 é composto de seis ciclos elementares, com uma duração de 195 segundos cada, que apresentam períodos em marcha lenta, acelerações e patamares de velocidade estabilizada, nos níveis de 15, 32, 50 e 35 km h<sup>-1</sup>, e desacelerações. Esse trajeto tem por objetivo reproduzir o trânsito das cidades, sendo denominado como ciclo urbano. A FIGURA 19 ilustra o ciclo elementar de velocidade em função do tempo para ensaios de emissões em motocicletas.

FIGURA 19 – CICLO ELEMENTAR - ENSAIO EM MOTOCICLOS



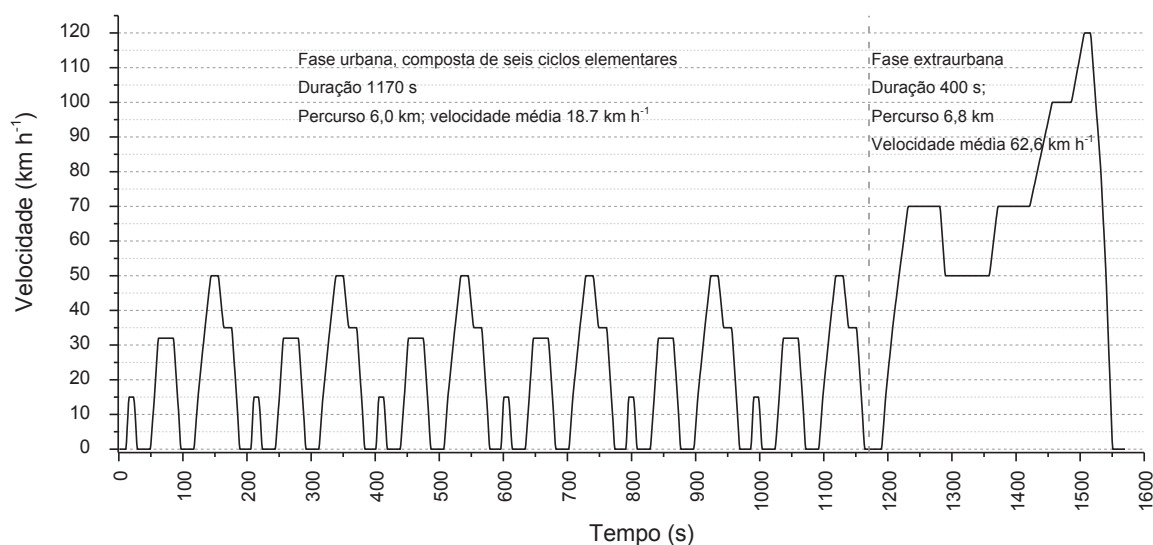
FONTE: Adaptado de WU et al. (1998).

Nos ensaios dos motocicletas das fases M1 e M2, somente após o final do segundo ciclo elementar suas emissões são coletadas para análise e quantificação. Justamente no período em que o motor está frio, quando ocorrem as maiores emissões até sua estabilização (CHAN et al., 1995), as emissões não são coletadas. Esse fato justifica-se por se tratar do estágio inicial da implantação do programa de controle. A partir da fase M3, as emissões são coletadas no instante inicial do ciclo.

No estágio seguinte, M3, o ciclo de testes pode ser dividido em uma ou duas fases, de acordo com a capacidade volumétrica do motor que equipa o veículo. Motocicletas com motores até 150 cm<sup>3</sup> efetuam apenas uma fase, o ciclo urbano. Para os motocicletas equipados com motores de cilindrada superior a 150 cm<sup>3</sup>, aplica-se, além do ciclo urbano, uma segunda fase denominada extraurbana, em que o

motociclo desenvolve velocidades que simulam uma condição de uso em estrada, chegando a  $120 \text{ km h}^{-1}$ . Essa segunda fase tem uma duração total de 400 s. Na FIGURA 20 pode-se observar o ciclo completo de velocidade em função do tempo, contemplando as fases urbana e extraurbana do ciclo de emissões em dinamômetro de chassi, segundo normativa europeia.

FIGURA 20 – CICLO PARA ENSAIOS DE EMISSÕES EM MOTOCICLOS



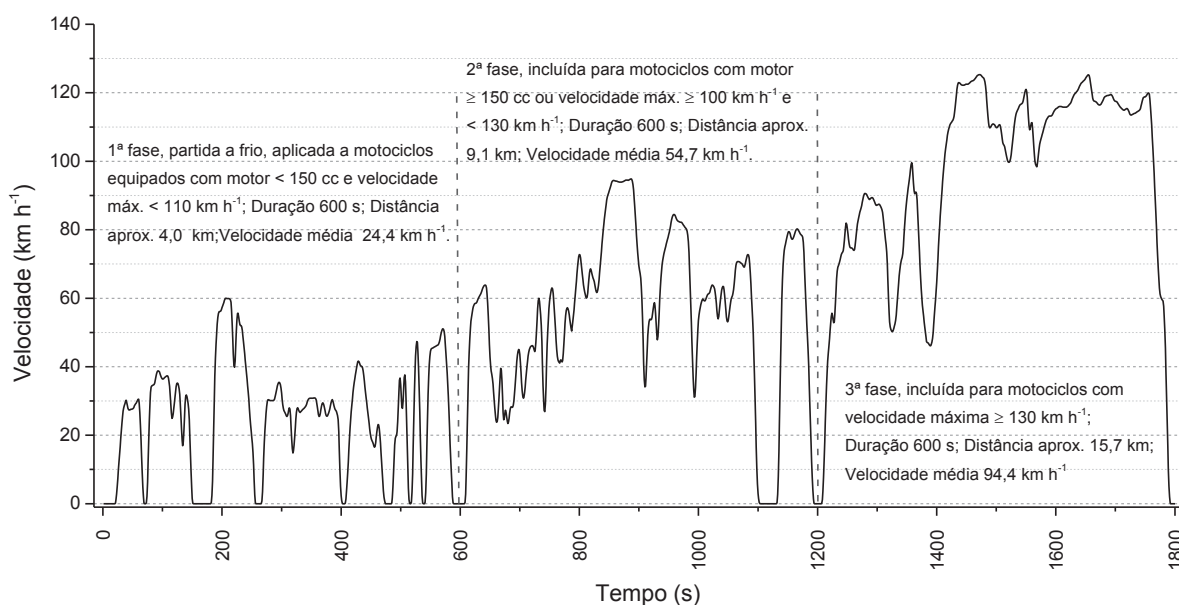
FONTE: Adaptado de GEIVANIDIS et al. (2008).

O trajeto desenvolvido durante o ensaio possui uma distância aproximada de 6,0 km no ciclo urbano e 6,8 km no ciclo extraurbano. A potência resistiva aplicada ao motociclo pelo dinamômetro durante o percurso desenvolvido é determinada em função de sua massa, mensurada com todos os reservatórios cheios, acrescendo-se 75 kg, peso padrão para o piloto. A normativa apresenta coeficientes de potência resistiva ao deslocamento de acordo com intervalos da massa citada anteriormente. Esses coeficientes determinam a força aplicada no motociclo durante o teste, em função de sua velocidade instantânea.

A refrigeração do motor do motociclo durante o teste é executada por um ventilador posicionado frontalmente ao veículo. A velocidade do ar de refrigeração imposta ao motor é proporcional à velocidade que o motociclo desenvolve, simulando, assim, as condições reais de operação. Durante os procedimentos de ensaio, a temperatura da sala de testes deve permanecer entre 20 e  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . No início do ensaio, a temperatura do óleo lubrificante e líquidos de arrefecimento, se houver, deve estar em  $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  da temperatura da sala.

O ensaio aplicado para os motociclos pertencentes à fase M4, ciclo WMTC, utiliza a mesma metodologia e equipamentos descritos anteriormente, sendo alterado o trajeto a ser percorrido. Esse ciclo apresenta características transientes de velocidade em função do tempo, sendo, assim, considerado mais representativo às condições normais de uso dos motociclos (FAVRE et al., 2009). O ensaio pode conter uma, duas ou três fases, de acordo com a velocidade máxima do veículo e capacidade volumétrica do motor (DAEMME et al., 2014a). A FIGURA 21 apresenta o ciclo completo, com três fases, com uma distância aproximada de 4,1 km para a fase 1 e 9,1 km e 14,5 km, respectivamente, para as fases 2 e 3.

FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO DO CICLO WMTC



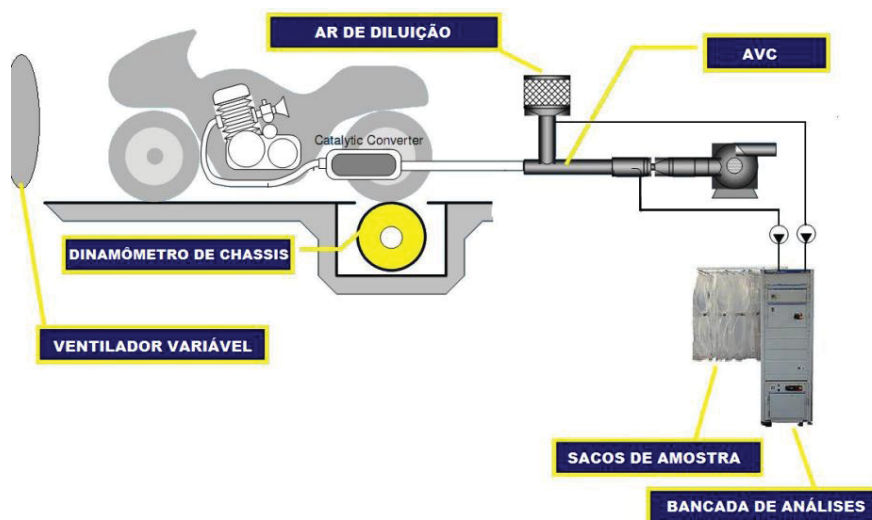
Fonte: Adaptado de DAEMME et al. (2016d).

Nos dois métodos de ensaios, durante todo o trajeto do motociclo desenvolvido sobre o dinamômetro para realização dos testes, as emissões de escapamento são direcionadas a um amostrador de volume constante (AVC), onde são diluídas com ar ambiente para evitar condensações e perdas de compostos.

Uma alíquota constante dos gases de escapamento diluídos é coletada e armazenada em sacos de amostragem, compostos de material inerte aos gases de escapamento. O mesmo processo ocorre para o ar de diluição da sala de ensaios. Ao final de cada fase encontra-se integralizada, no respectivo saco, uma amostra representativa dos gases emitidos pelo motociclo durante o ensaio de emissões. Essa amostra será então direcionada para os detectores específicos, que

quantificam os poluentes. Na FIGURA 22 pode-se observar a configuração esquemática de uma sala de ensaios de emissões em motocicletas.

FIGURA 22 – SALA DE ENSAIOS EM MOTOCICLOS



FONTE: Adaptado de GARCIA et al. (2013).

Na FIGURA 23 observa-se uma amostra dos experimentos realizados na pesquisa preparada para a execução do ensaio de emissões. É possível verificar a roda propulsora sobre o dinamômetro de chassi, o sistema de refrigeração do motociclo a sua frente e, ao fundo, os equipamentos de coleta das emissões.

Ao final do ensaio, o motociclo é mantido em marcha lenta, sendo coletadas informações de rotação do motor e concentração de CO e CO<sub>2</sub>. O objetivo dessa medição é a determinação dos níveis de emissão de CO em marcha lenta (ABNT, 2010b).

No atual modelo de regulamentação são quantificadas as emissões de THC, CO e NO<sub>x</sub>, com os detectores empregados seguindo os mesmos princípios de detecção dos ensaios em veículos. Além dos gases normalizados, foram analisadas as emissões de CH<sub>4</sub>, NMHC e CO<sub>2</sub>. Para quantificação dos gases, ao final de cada fase, mensuram-se os compostos armazenados nos balões de amostra e, com base em sua concentração, densidade, volume total de gás amostrado pelo AVC e a distância percorrida pelo motociclo, calculam-se os valores finais de emissão, apresentados em g km<sup>-1</sup>. O consumo de combustível é calculado com base nas emissões de CO, THC e CO<sub>2</sub>, pelo método de balanço de carbono (ABNT, 2010a), sendo expresso em km L<sup>-1</sup>.



FIGURA 23 – MOTOCICLO PREPARADO PARA ENSAIO DE EMISSÕES



FONTE: INSTITUTOS LACTEC (2015).

### 3.4 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DAS EMISSÕES DE ALDEÍDOS

A quantificação das emissões de aldeídos é normalizada no Brasil para os veículos leves do ciclo Otto pela norma NBR 12026 (ABNT, 2009), que preconiza o procedimento de coleta e análise dos aldeídos e cetonas pelo método de 2,4 dinitrofenil-hidrazina (DNPH) por cromatografia em fase líquida de alta eficiência (HPLC ou CLAE). Os procedimentos de amostragem são efetuados durante o ensaio de emissões para os veículos automotores leves de acordo com a NBR 6601 (ABNT, 2012a).

O ensaio consiste na amostragem de uma alíquota contínua do gás de escapamento diluído no interior do AVC durante o teste de emissões. Direciona-se o fluxo dessa amostra a frascos lavadores de gases, contendo uma solução absorvente de 2,4 dinitrofenil-hidrazina (DNPH) em acetonitrila (ACN).

A solução absorvente contendo DNPH é utilizada para retenção das carbonilas, especificamente dos grupos funcionais de aldeídos e cetonas, não reagindo com as carbonilas de outros grupos tais como álcool e ácido carboxílico. O resultado da reação entre os aldeídos e a solução é a formação do derivado carbonílico, que fica retido na solução absorvente, possibilitando sua posterior detecção.

Para cada fase do ciclo de emissões e para o ar de diluição, montam-se pares de frascos lavadores de gás interligados em série, contendo cerca de 30 ml da solução absorvente em cada um. A FIGURA 24 apresenta um exemplo de frascos lavadores de gás sendo preparados com solução absorvente para uso em ensaio com coleta de aldeídos.

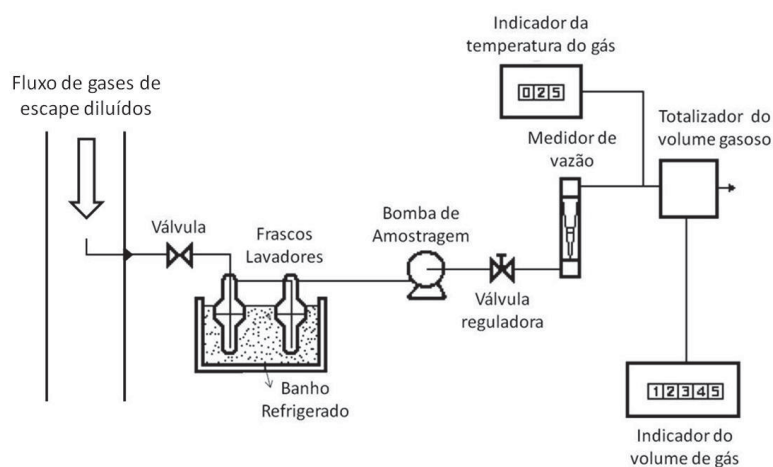
FIGURA 24 – PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO ABSORVENTE



FONTE: DAEMME (2012).

O conjunto de frascos lavadores de gás é instalado no amostrador de aldeídos, ficando em ambiente refrigerado. A FIGURA 25 ilustra o fluxo do gás de escapamento no AVC e a retirada de uma amostra contínua para os frascos lavadores de gás durante o ensaio de emissões.

FIGURA 25 – ESQUEMA DA COLETA DE ALDEÍDOS



FONTE: Adaptado de ABNT NBR 12026 (ABNT, 2009)

A vazão da amostra de gás de escapamento diluído pelo AVC deve ser controlada entre 1,5 e 3,0 L min<sup>-1</sup>. Para os experimentos deste estudo, utilizou-se

uma vazão de  $2,0 \text{ L min}^{-1}$ . As vazões devem ser mensuradas durante o ensaio, permitindo quantificar o volume de gás que foi borbulhado nos frascos lavadores de gás. Ao final do ensaio, a solução de cada fase é transferida para um balão volumétrico e avolumada para 100 ml, utilizando-se acetonitrila grau HPLC.

Para quantificação dos aldeídos utilizou-se a técnica de cromatografia em fase líquida de alta eficiência, método de separação de componentes entre duas fases: estacionária (coluna cromatográfica) e fase móvel (LANÇAS, 2009).

Após a separação, os compostos necessitam ser identificados e quantificados. Um detector de luz ultravioleta visível (UV-Vis), no comprimento de onda de 365 nm, foi empregado. A determinação da concentração dos compostos realiza-se pelo uso de padrões externos, efetuando-se uma comparação direta das áreas dos picos cromatográficos das amostras com as áreas de padrões de derivados carbonílicos, com concentração conhecida, propiciando sua quantificação (LANÇAS, 1993).

As emissões de escapamento possuem diversos tipos de aldeídos, sendo que para esta pesquisa as análises foram efetuadas apenas para o acetaldeído e formaldeído, legislados para os automóveis no Brasil desde 1992, que são os principais aldeídos encontrados nas emissões provenientes dos motores a combustão (TANNER et al., 1988; PENG et al., 2008; DAEMME; PENTEADO; FERREIRA, 2011; HO; KIM, 2011; KUMAR et al., 2011).

O resultado da análise dos aldeídos com uso da técnica de cromatografia em fase líquida apresenta um valor em massa emitido durante cada fase do ciclo de emissões. Esse valor dividido pela distância percorrida durante as fases do ensaio é apresentado em miligramas por quilômetro ( $\text{mg km}^{-1}$ ).

Para os veículos comerciais leves, motocicletas e motores pesados, até o momento, não existe uma legislação definindo limites ou regulamentando métodos de coleta e quantificação de aldeídos. A Associação de Engenharia Automotiva (AEA) e o Comitê Brasileiro Automotivo da ABNT (CB05) possuem um grupo de trabalho desenvolvendo uma proposta de norma para coleta de aldeídos em motocicletas, essa baseada na NBR 12026 (AEA, 2015a).

Nos ensaios para coleta de aldeídos em motocicletas foram aplicados os mesmos procedimentos de coleta e análise utilizados pelos veículos leves e já normalizados pela NBR 12026. Esse método foi selecionado devido aos ensaios de emissões nessas três categorias de veículo automotor se utilizar do mesmo

princípio, ou seja, uso de dinamômetro de chassi para simulação de carga e amostragem das emissões por meio de AVC. Esse método já foi empregado em pesquisas e apresentou resultados satisfatórios em estudos envolvendo diferentes motocicletas (DAEMME; PENTEADO; FERREIRA, 2010; DAEMME, 2012).

### 3.5 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DE ÁLCOOL NÃO QUEIMADO

A coleta das emissões de álcool não queimado (ANQ), gerada por veículos automotores leves do ciclo Otto, é regulamentada pela NBR 15598 (ABNT, 2008) e nesta pesquisa visa quantificar a fração de ANQ emitida pelos motores durante a realização dos ensaios de emissões. Os equipamentos e princípios são semelhantes aos empregados para o ensaio de aldeídos nos veículos leves regido pela NBR 12026.

A amostragem foi realizada com uso de dois frascos lavadores de gás, ligados em série, para cada fase do ensaio. Para retenção do composto é usada água destilada, que absorve a emissão da parcela de ANQ presente na amostra. O fluxo do gás de escape diluído, em uma vazão de  $2,0 \text{ L min}^{-1}$ , foi borbulhado nos frascos e essa solução foi posteriormente avolumada para 50 ml.

A amostra foi analisada com uso da técnica de cromatografia em fase gasosa (CG), com detector de ionização de chama. A quantificação usou o princípio de padrão externo, onde amostras com concentração conhecida foram injetadas para comparação direta das áreas dos picos cromatográficos da amostra e padrões. O resultado final foi expresso em  $\text{mg km}^{-1}$ , considerando as vazões do ensaio e a distância percorrida.

Para os motocicletas, que não possuem regulamentação sobre essa emissão, foi utilizado o mesmo procedimento devido à similaridade do ensaio de emissões entre essa categoria e a dos veículos leves do ciclo Otto, ou seja, coleta da amostra com uso de um AVC.

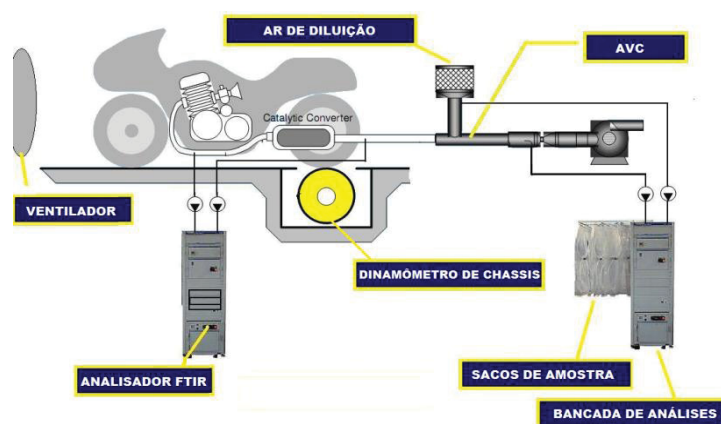
### 3.6 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DAS EMISSÕES NÃO REGULAMENTADAS

Para coleta e análise das emissões não regulamentadas de  $\text{NH}_3$  e  $\text{N}_2\text{O}$  foi utilizada a técnica de FTIR. Utilizou-se um equipamento desenvolvido especificamente para medições automotivas, modelo AVL SESAM FTIR, composto

de linha aquecida para coleta dos gases de escapamento, desumidificador, detector Thermo Nicolet Antaris e *software* para tratamento de dados.

As emissões coletadas foram os gases brutos, sem diluição, diretamente da linha de escapamento das amostras ensaiadas. A FIGURA 26 ilustra a inclusão do equipamento FTIR no arranjo da sala de ensaios em motocicletas, demonstrando coletas de emissões antes e após o catalisador. O mesmo método de coleta foi adotado para as demais classes de amostras.

FIGURA 26 – CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS COM USO DO FTIR



FONTE: DAEMME (2012).

A medição dos gases brutos, sem diluição, justifica-se pelo fato de alguns componentes não regulamentados possuírem baixas concentrações, e com sua diluição a quantificação ficaria prejudicada. Além disso, existem recomendações para que as emissões de amônia sejam quantificadas antes da diluição devido à reatividade do composto com a superfície do equipamento de amostragem (AVC) e com outros compostos como  $H_2O$  e  $NO_x$  (CARB, 2007; BIELACZYK et al., 2012).

Essa metodologia permite uma amostragem contínua dos gases de escapamento, em uma frequência de 1 Hz, propiciando uma análise do comportamento das emissões durante todo o ensaio. O *software* (FTIR Onmic) do equipamento permite a escolha do combustível utilizado (diesel, etanol e gasolina) selecionando assim os compostos mais prováveis de serem encontrados nos gases de exaustão.

Esse equipamento opera com uma calibração prévia do espectro dos gases medidos durante seu ajuste e comissionamento na fábrica, não sendo possível realizar mudanças nos parâmetros da calibração das concentrações. Para verificação da leitura das concentrações de  $N_2O$  e  $NH_3$  foram realizadas

comparações dos valores medidos pelo equipamento com gases de concentração conhecida (gases de referência). A concentração e incerteza declarada pelo fabricante dos gases estão apresentadas na TABELA 9, bem como o resultado médio de duas campanhas de medidas, cada uma com quatro leituras para o N<sub>2</sub>O. Para a amônia foram utilizados durante o período de verificação dois cilindros em duas campanhas e os resultados são listados na tabela abaixo.

TABELA 9 – DADOS DOS GASES DE REFERÊNCIA E LEITURAS COMPARATIVAS NO FTIR

Componente	Certificado	Validade	VC <sup>2</sup> e incerteza (ppmv)	VM <sup>3</sup> e incerteza <sup>4</sup> (ppmv)	Erro (%)
N <sub>2</sub> O	41166051/WM <sup>1</sup>	25/04/16	50,79±0,46	50,20±0,14	1,2
NH <sub>3</sub>	41393009/WM <sup>1</sup>	22/10/16	100,20±1,24	98,78±0,13	1,4
NH <sub>3</sub>	41432593/WM <sup>1</sup>	04/02/17	100,10±1,24	98,48±0,17	1,6

FONTE: O autor (2017).

NOTAS: <sup>1</sup> – Fabricante White Martins; <sup>2</sup> – Valor convencional; <sup>3</sup> – Valor da medida; <sup>4</sup> – Incerteza do tipo A.

A avaliação dos resultados obtidos seguiu a mesma metodologia usada pelo laboratório para aprovar o uso dos gases de referência utilizados na calibração dos analisadores que quantificam as emissões regulamentares, em que o valor declarado do gás não pode apresentar uma variação maior que 2% quando comparado com a leitura do equipamento previamente calibrado. Nesse caso, não se avaliou o gás, e sim o desempenho do analisador de gases, que foi considerado apto a realizar as medições.

Para determinação do limite de quantificação no processo de medição utilizou-se a metodologia baseada na proposição de Livingston (2008), ou seja, leituras do equipamento com ar ambiente após o processo de *background*. O *background* visa retirar da análise os valores de “contaminação” do ar ambiente, criando um espectro de fundo que elimina das medições esses valores, procedimento realizado por meio do *software* de controle do equipamento. O processo de criar o espectro de fundo foi utilizado sempre antes da realização dos ensaios. O limite de detecção foi então calculado pela equação (14):

$$LD = Conc_B + (s \times t) \quad (14)$$

sendo:

*LD* – o limite de detecção para o composto em estudo;

$\text{Conc}_B$  – a concentração do composto (ppmv) medida no ar ambiente;

$s$  – o desvio padrão amostral referente às concentrações lidas no ar ambiente;

$t$  – o valor tabelado de *t-student* para um nível de confiança de 99%, usando  $n-1$  graus de liberdade (número de aquisições efetuadas pelo equipamento durante esse procedimento).

Para levantamento dos dados, executaram-se cinco ensaios em diferentes datas, com um mínimo de 600 aquisições (10 minutos com coleta a 1 Hz), encontrando-se valores de LD que variaram de:

- $\text{N}_2\text{O}$ : -0,58 a 0,91 ppmv;
- $\text{NH}_3$ : -0,73 a 1,39 ppmv.

Com esses resultados, padronizou-se o valor mínimo considerado de detecção para  $\text{N}_2\text{O}$ : 1 ppmv e para  $\text{NH}_3$ : 1,5 ppmv, sendo quantificados os valores acima dessas emissões.

Para determinação da massa emitida durante os ensaios de emissões, empregou-se a equação (15), adaptada de Livingston (2008):

$$M_c = \frac{(v \times d_c \times c) \times 10^{-3}}{D} \quad (15)$$

em que:

$M_c$  – massa do composto em estudo ( $\text{mg km}^{-1}$ );

$v$  – volume amostrado ( $\text{m}^3$ );

$d_c$  – densidade do composto em estudo ( $\text{g m}^{-3}$ );

$c$  – concentração do composto (ppmv);

$D$  – distância percorrida no ensaio (km).

As condições consideradas para volume e densidade foram: temperatura 293,15 K e pressão 101,325 KPa. A densidade utilizada para os gases  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NH}_3$  foi de, respectivamente,  $1.843 \text{ g m}^{-3}$  e  $708 \text{ g m}^{-3}$ .

Para determinação do volume amostrado nos ensaios de motocicletas e veículos foram usados dois métodos distintos. Apesar de os ensaios dessas categorias de veículos serem realizados com a mesma base de configuração, uso de AVC, as salas de ensaios possuem características e diferentes equipamentos disponíveis.



Para os ensaios em motocicletas foi utilizado método *CO<sub>2</sub> tracer*, que utiliza a medição simultânea de CO<sub>2</sub> bruto do gás de exaustão e diluído no AVC para determinar o volume de gás de escapamento (WIERS; SCHEFLER, 1972). A vazão amostrada pelo AVC é controlada por um venturi crítico, mantendo-se praticamente constante. A vazão instantânea é calculada pela equação (16), considerando-se uma frequência de aquisição de 1 Hz:

$$Q = \frac{C1 \times \Delta P}{\sqrt{T}} \quad (16)$$

em que:

$Q$  – vazão (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>);

$C1$  – coeficiente de calibração da garganta do venturi;

$\Delta P$  – diferença entre a pressão atmosférica (KPa) e a pressão na entrada do venturi;

$T$  – temperatura (K) do gás na entrada do venturi.

Para obtenção do volume de gás de escapamento empregou-se uma instrumentação para medir a concentração de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão, logo após o escapamento do motociclo; simultaneamente, mediu-se a concentração de CO<sub>2</sub> dos gases de escape diluídos no interior do AVC. Como a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente é conhecida ao final do ensaio de emissões, é possível determinar o fator de diluição a cada instante do ensaio com a equação (17):

$$FD = \frac{CO2_B - CO2_A}{CO2_D - CO2_A} \quad (17)$$

sendo:

$FD$  – fator de diluição dos gases de escape;

$CO2_B$  – concentração de CO<sub>2</sub> bruto, medido diretamente na exaustão (antes de ser diluído);

$CO2_A$  – concentração de CO<sub>2</sub> no ar ambiente

$CO2_D$  – concentração de CO<sub>2</sub> no gás de escapamento diluído no interior do AVC.

Conhecendo a vazão total do AVC e o fator de diluição a cada instante, pode-se calcular a vazão dos gases de exaustão pela equação (18):



$$q = \frac{Q}{FD} \quad (18)$$

sendo:

$q$  – vazão dos gases de escapamento ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

$Q$  – vazão total no AVC ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

$FD$  – fator de diluição. Considerando-se a frequência de aquisição de 1 Hz.

A massa emitida foi calculada com o uso da equação (15), utilizando os valores das concentrações dos compostos medidos na frequência de 1 Hz pelo FTIR combinados com a vazão de escapamento a cada segundo do ciclo de emissões. A soma das massas emitidas durante o ciclo, dividida pela distância percorrida no ensaio, representa o valor final ( $\text{g km}^{-1}$ ).

Nos ensaios em veículos utilizou-se o volume total amostrado pelo AVC durante o ensaio e a razão de diluição para determinar o volume de gás de escapamento, conforme empregado por Borsari (2015). Nesse método, o fator de diluição é calculado pelas emissões médias de  $\text{CO}_2$ , THC e CO (ABNT, 2012a) da amostra em teste durante o ensaio. O fator de diluição é obtido pela aplicação da equação (19):

$$FD = \frac{CO_{2ES}}{CO_{2E} + (THC_E + CO_E) \times 10^{-4}} \quad (19)$$

sendo:

$FD$  – fator de diluição;

$CO_{2ES}$  – porcentagem teórica de  $\text{CO}_2$  no gás de escapamento de uma combustão em condições estequiométricas, cujo valor adotado pela NBR 6601 é de 13,4;

$CO_{2E}$  – valor medido no ensaio (%);

$THC_E$  e  $CO_E$  – valores em ppmv mensurados no ensaio.

Aplicando o volume total de amostragem e o FD médio durante cada fase do ensaio na equação (18), obtém-se o volume médio de gás de exaustão durante cada fase do teste. Com as informações de volume médio de gás de escapamento, média do composto em estudo e distância percorrida, pode-se determinar a massa emitida com o uso da equação (15).

### 3.7 TRATAMENTO DOS DADOS

Anteriormente à fase de análise de dados, executaram-se verificações de consistência dos resultados encontrados nos ensaios. Os resultados foram avaliados em gráficos *box plot* que apresentam de forma visual informações da média, mediana e da dispersão dos resultados e a esses dados foram acrescentadas informações do coeficiente de variação entre as repetições realizadas para cada amostra.

Para determinação dos fatores de maior representatividade a serem aplicados na regressão e correlação entre compostos, utilizou-se a ferramenta de análise de componentes principais, visando determinar a interação e a relação entre as componentes que fizeram parte dos ensaios e verificação da possibilidade de redução do número de fatores em análise.

Os fatores de emissão calculados para cada ano e fatores de maior representatividade foram utilizados com técnicas de regressão para determinação da estimativa dos fatores de emissão para os poluentes em estudo através de uma equação que representasse o modelo.

Empregou-se a técnica de análise de variância (ANOVA) em conjunto com o teste de Tukey para avaliação do desempenho das amostras com diferentes combustíveis em emissões. Nos testes estatísticos empregados utilizou-se um nível de significância de 5%.

Para demonstrar a estimativa da incerteza nos fatores de emissão calculados, foram combinadas as informações da incerteza do tipo A, entre as amostras de motocicletas usadas nos experimentos, somadas ao erro apresentado pela regressão.

### 3.8 MÉTODO PARA ESTIMAR OS FATORES DE EMISSÃO

Os fatores propostos foram calculados com base nas emissões da frota de veículos utilizados nesta pesquisa, literatura, informações do Inventário Nacional de Emissões e Relatórios da CETESB (MMA, 2014; CETESB, 2016).

A proposta de adequação dos fatores de emissões para os compostos regulamentares (THC, CO e NO<sub>x</sub>) foi executada por meio de uma combinação dos valores apresentados no inventário nacional de emissões e relatórios da CETESB

com os valores das emissões encontradas nesta pesquisa, utilizando-se técnica de regressão. Aos fatores de emissão acresceram-se fatores de majoração das emissões, com intuito de simular a presença de veículos alto emissores na frota. A determinação do fator de majoração utilizou dados dos ensaios realizados nesta pesquisa em veículos alto emissores para as fases em que não havia uso de catalisadores. Nas fases com uso dessa tecnologia, utilizaram-se informações da literatura; na sua ausência, efetuaram-se experimentos em laboratório para determinar essas emissões. Assumiu-se que, após o décimo ano de uso, parte da frota será composta por veículos alto emissores, utilizando como referência as proporções apresentadas por Branco (2015).

A determinação dos fatores de emissão regulamentados fundamentou-se no princípio de propor um fator que exprima a degradação dos veículos com seu uso, sendo esse fator combinado aos fatores e estimativas do IEV, conforme intensidade de uso. Os valores de acúmulo de quilometragem adotados foram os sugeridos pelo IEV, não se utilizando os valores acumulados no odômetro das amostras, visto que alguns modelos e anos de fabricação apresentam uma totalização de máxima de 99.999 km, zerando o totalizador após atingir 100.000 km rodados.

No caso dos motocicletas, o IEV não considera a deterioração das emissões, sendo utilizados os fatores de degradação propostos nesta pesquisa. Para os veículos leves de passageiros, que utilizam um fator de degradação, essa informação foi combinada com os fatores propostos. Para os veículos das fases L2, L3 e L4, empregou-se o fator apresentado pelo IEV até o acúmulo de 80.000 km, e após, o uso do fator proposto.

Os veículos das fases L5 e L6 possuem características de limites mais severas de emissões. Observa-se, ainda, que, de acordo com o padrão de intensidade de uso, veículos com menos de quatro anos de fabricação não atingiram acúmulo de 80.000km. Os fatores de degradação usados pelo IEV foram determinados pelos fabricantes para veículos com tecnologias para os limites de emissão das fases L3 e L4. Assim, para as fases L5 e L6, adotou-se como fator de degradação os dados propostos nesta pesquisa. Visando otimizar as estimativas, os valores das emissões dos veículos usados foram comparados com as informações de veículos novos do mesmo modelo, essas fornecidas pela CETESB.

Para determinação dos fatores de emissão de NMHC, efetuaram-se correlações com as emissões de THC, obtendo-se uma equação geral de acordo

com a classe dos veículos, combustível e fases do programa de controle de emissões. Para os ensaios de veículos, utilizaram-se informações dos ensaios do ciclo urbano (FTP) e estrada (HWFET) para compor as análises. O fator de emissão para o metano foi gerado pela subtração das emissões de NMHC das emissões de THC.

No caso dos motocicletos, em que os aldeídos não são regulamentados e não há uma base de dados com informações dessas emissões, buscou-se uma correlação com as emissões regulamentadas de THC, CO, NO<sub>x</sub> para determinação dos fatores de emissão.

Para as emissões não regulamentadas de amônia e N<sub>2</sub>O utilizaram-se os valores médios dos ensaios realizados em laboratório para estimar os fatores de emissão.

Durante a evolução do programa de emissões do PROCONVE/PROMOT, os combustíveis modificaram-se em suas formulações e teores de enxofre. Visando empregar combustíveis compatíveis com cada fase do programa, os fatores de emissões desenvolvidos nesse trabalho utilizaram combustíveis diferentes para cada estágio do programa (informações sobre combustíveis são apresentadas no APÊNDICE 5). Para veículos fabricados até o ano de 2004, utilizou-se a gasolina especificada como A22-S800; para veículos fabricados entre 2005 e 2013, a gasolina A22-S200 (gasolina de referência para emissões da fase L5) e, para veículos fabricados após 2014, a gasolina A22-S50. Esses combustíveis são compatíveis com os usados nos processos de homologação dos anos citados.

Com referência aos motocicletos, observa-se que as emissões dos veículos ensaiados com motores acima de 150 cm<sup>3</sup> foram combinadas com os demais resultados, utilizando um fator de ponderação de acordo com as vendas de motocicletos do período de seu ano de fabricação. Essa informação é disponibilizada anualmente nos relatórios da Associação dos fabricantes de motocicletos. Nos últimos dez anos, as vendas de motocicletos com motores de até 150 cm<sup>3</sup> representam aproximadamente 87% do total (ABRACICLO, 2013, 2016).

Devido às diferenças nas características das classes de veículos estudados – motocicletos e veículos leves de passageiros – quanto a suas tecnologias e à base de dados disponível sobre suas emissões, as particularidades para determinação dos fatores de emissão serão abordadas em conjunto com o desenvolvimento dos cálculos.

### 3.9 CENARIZAÇÃO

Para permitir a estimativa das emissões entre os anos de 1980 a 2020, foi necessária a adoção de premissas no tocante à frota de veículos, correção da intensidade de uso, divisão entre o uso da gasolina/etanol na frota *flex fuel* e fatores de emissão adotados. Os parâmetros adotados para o período compreendido até o ano de 2016 foram os citados na literatura (ABRACICLO, 2013; MMA, 2014; CETESB, 2016; ABRACICLO, 2017; ANFAVEA, 2017), seguindo o padrão adotado pelo IEV (MMA, 2014).

Para os anos de 2017 a 2020 foram adotadas projeções dos valores de frota, correção de intensidade de uso e divisão de uso da frota *flex fuel* entre etanol e gasolina. Os valores propostos foram estimados com base no histórico dos últimos anos. Para os fatores de emissão nas projeções de 2016 a 2020 foi utilizado o valor apresentado para o ano de 2015 (CETESB, 2016). O detalhamento das informações utilizadas para estabelecer os cenários está descrito no APÊNDICE 6.

### 3.10 CALIBRAÇÕES E VERIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DURANTE O PROGRAMA DE ENSAIOS

Os procedimentos de calibração e verificação dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios foram efetuados de acordo com os preceitos das normas técnicas adotadas pelo CONAMA para homologação de veículos, motores e motocicletas. Observou-se, ainda, que o laboratório utilizado para condução dos experimentos adota uma política da qualidade e boas práticas laboratoriais implementadas, que incluem:

- procedimentos documentados e registros das atividades desenvolvidas;
- utilização de materiais de referência certificados;
- calibrações periódicas em sensores, utilizando, sempre que disponíveis, laboratórios certificados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) – Rede Brasileira de Calibração (RBC);
- ensaios desenvolvidos por técnicos treinados;
- processos de auditorias internas e externas regulares;
- participação em programas de ensaios de comparação interlaboratorial promovidos pelo INMETRO e outras entidades;

- processos rotineiros de verificação nos equipamentos e sensores, destacando-se:
  - utilização semanal de veículos (ciclos Otto e Diesel) de referência para verificação da funcionalidade e estabilidade dos equipamentos das salas de testes;
  - injeção semanal de propano através de uma placa de orifícios calibrada (CFO) para verificação da diluição e existência de possíveis vazamentos no AVC.

## 4 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÕES

Nesse capítulo apresentam-se os resultados experimentais obtidos em laboratório e os métodos para sua combinação com os dados disponíveis de ensaios de homologação e controle de produção para estimar os fatores de emissão. As análises estão divididas em motocicletas e veículos leves de passageiros, e essas categorias subdivididas nas fases abrangidas pela legislação.

### 4.1 RESULTADOS EM MOTOCICLOS

Inicialmente abordam-se as correlações entre as emissões e fatores que as influenciam, objetivando demonstrar suas relações e possibilidades de simplificação. Para determinação dos fatores de emissões regulamentadas (CO, NO<sub>x</sub> e THC) as fases do PROMOT foram abordadas de forma individual. Para as emissões não regulamentadas de NMHC, CH<sub>4</sub>, aldeídos geraram-se correlações a serem aplicadas em conjunto com as emissões regulamentares. O fator de emissão para amônia e N<sub>2</sub>O foi determinado pela média observada nos ensaios de laboratório.

#### 4.1.1 Determinação dos Fatores de Emissão

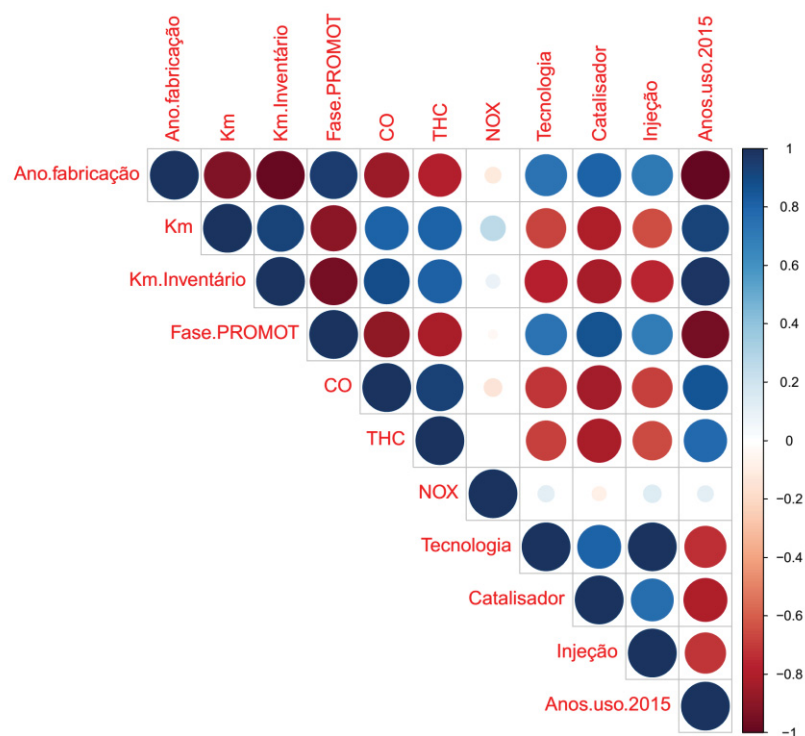
As emissões regulamentadas na legislação brasileira, seguindo a tendência mundial, abrangem o CO, THC e NO<sub>x</sub>, compostos com maior emissão nos gases de escapamento. Os inventários nacionais de emissões já incluem projeções para outros gases, como NMHC, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, visando estimar as emissões e seu impacto ambiental, propiciando subsídios para as políticas de controle ambiental. Nesta pesquisa, os fatores de emissão dos compostos citados foram revistos, incluindo-se a degradação dos motocicletas utilizando-se de dados experimentais de amostras em condição de uso real. Estimaram-se, ainda, os fatores de emissão para os aldeídos e NH<sub>3</sub>.

Com intuito de verificar os fatores que exercem influência nas emissões e selecionar esses dados para aplicação na regressão utilizada na estimativa dos fatores de emissão, efetuou-se uma análise de componentes principais (PCA) com os dados das emissões regulamentadas e dos principais fatores que exercem influência sobre elas. As onze variáveis selecionadas e consideradas foram: Ano de fabricação do motociclo; Anos de uso em 2015; Tipo de sistema de injeção de

combustível: carburador (*score* 0) ou injeção eletrônica (*score* 1); Presença de catalisador (*score* 1) ou ausência de catalisador (*score* 0); Tecnologia: sem catalisador e carburada (*score* 0); com catalisador e carburada (*score* 1); com catalisador e injeção eletrônica de combustível (*score* 10); Fase do PROMOT; Estimativa do acúmulo de quilometragem segundo dados do IEV; Acúmulo de quilometragem registrada no odômetro do veículo; Emissões regulamentadas (CO, THC e NO<sub>x</sub>). Os valores atribuídos a variáveis com mais de uma configuração (*score*) não representam um valor de importância e servem unicamente para distinguir as amostras na análise.

A matriz de correlação apresentada na FIGURA 27 demonstra a relação entre as variáveis selecionadas. Observa-se que, com exceção do NO<sub>x</sub>, todas as demais variáveis possuem um valor elevado de correlação entre si (acima de 0,5), demonstrando a correlação existente entre as características dos veículos, fase do PROMOT e emissões.

FIGURA 27 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS



FONTE: O autor (2017).

O processo para retenção dos componentes principais seguiu os preceitos de Kaiser (MINGOTI, 2005), chamado de raiz latente, em que apenas os componentes com autovalor maior que um são utilizados. A TABELA 10 apresenta



os dados de autovalor e porcentagem de variância explicada pelos novos eixos determinados pelos componentes principais. Observa-se que apenas os dois primeiros componentes principais têm autovalor acima de um, com porcentagem de variância acumulada de 87,7%, ou seja, as componentes 1 e 2 explicam 87,7% da variabilidade do sistema.

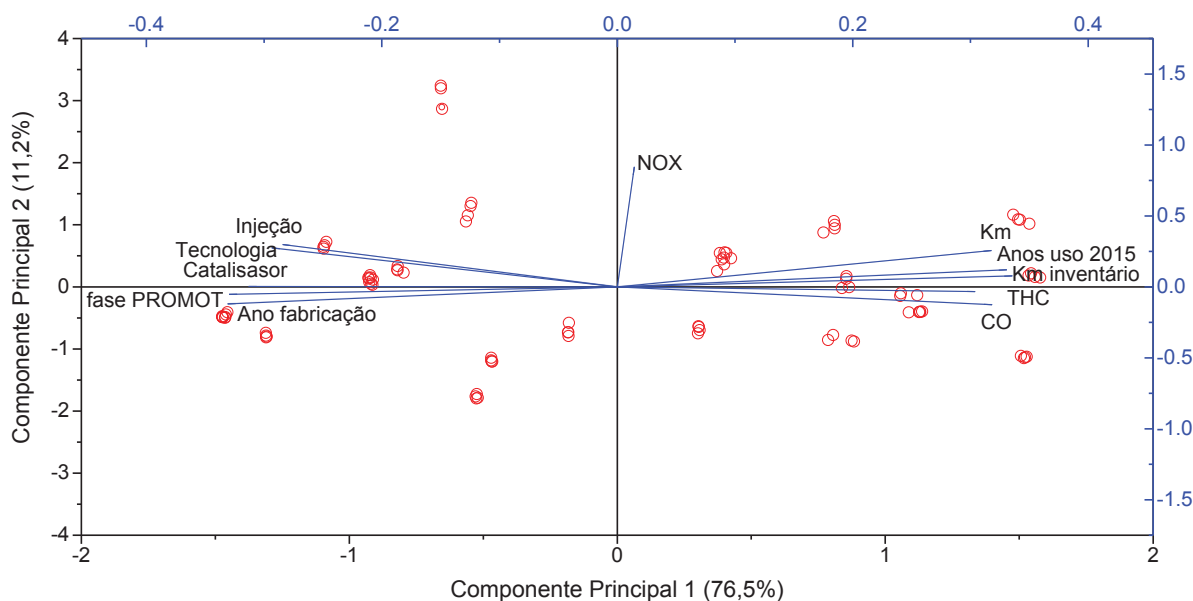
TABELA 10 – DADOS DE AUTOVALOR E PORCENTAGEM DE VARIÂNCIA DOS COMPONENTES

Componente	Autovalor	% de variância	% de variância acumulada
1	8.42	76.5%	76.5%
2	1.23	11.2%	87.7%
3	0.65	5.9%	93.6%
4	0.38	3.5%	97.0%
5	0.17	1.5%	98.6%
6	0.08	0.7%	99.3%
7	0.04	0.4%	99.6%
8	0.03	0.3%	99.9%
9	0.02	0.1%	100.0%
10	0	0.0%	100.0%
11	0	0.0%	100.0%

FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 28 apresenta o gráfico de carga dos componentes principais retidos, componentes 1 e 2, demonstrando a correlação das características avaliadas com as componentes principais. Observa-se que os dados avaliados, com exceção do NO<sub>x</sub>, distribuem-se ao longo do componente principal 1, que explica 76% da variabilidade. As variáveis situadas ao lado positivo do componente principal 1 (acúmulo de quilometragem, anos de uso e emissões de THC e de CO) são inversamente proporcionais às demais, situadas ao lado negativo. Ou seja, as emissões de THC e CO aumentam com acúmulo de quilometragem e anos de uso e reduzem com aplicação de tecnologias como injeção eletrônica de combustível, catalisador e com o avanço da legislação do PROMOT. Com essas informações pode-se concluir que a utilização apenas do ano de fabricação dos motocicletos nas regressões é suficiente para carregar as demais informações das variáveis independentes que exercem influência sobre as emissões. As emissões de NO<sub>x</sub> não apresentaram uma correlação direta com os fatores apontados (o perfil dessas emissões está apresentado na FIGURA 29 em formato *box plot*). Observa-se, ainda, o coeficiente de variação para cada amostra, representado pelo símbolo “asterisco”, segundo Martins (2010), valores abaixo de 15% demonstram uma baixa dispersão.

FIGURA 28 – CARGA DOS COMPONENTES PRINCIPAIS



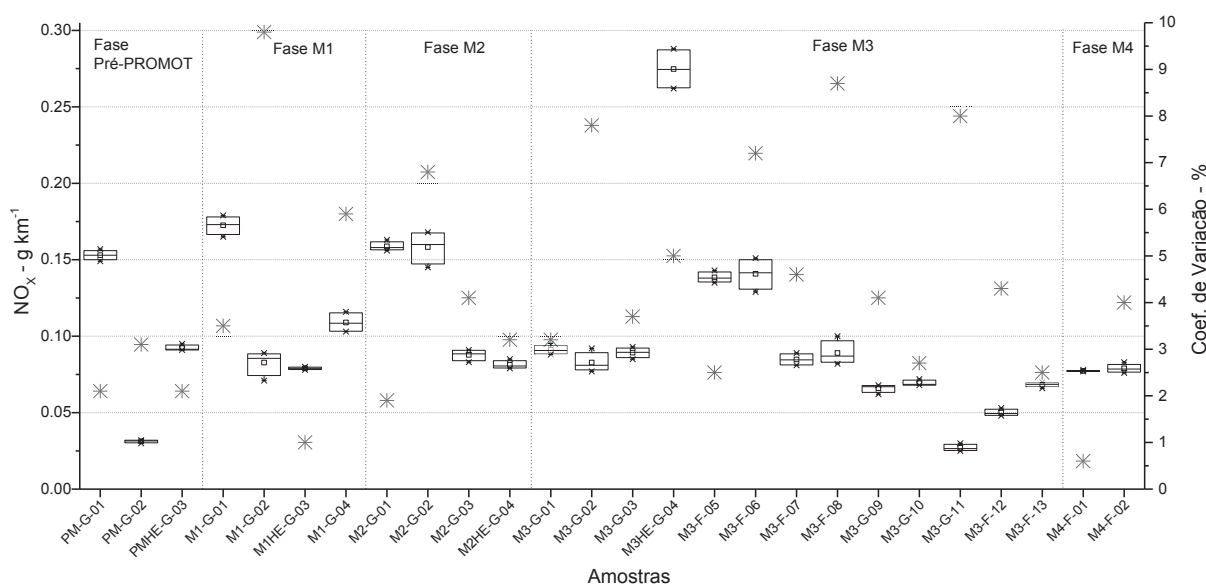
FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 29 observam-se emissões para o  $\text{NO}_x$  semelhantes entre as diferentes fases do PROMOT. Por exemplo, o motociclo PM-G-02, fabricado antes da vigência do programa de controle da poluição causada por esses veículos, possui emissões no patamar dos motocicletos das fases M3 e M4. Como a formação de  $\text{NO}_x$  está ligada diretamente à qualidade da combustão (HEYWOOD, 1976; 1988), o desgaste de motocicletos das fases PP, M1 e M2 tende a piorar a qualidade da combustão, aumentando as emissões de THC e CO e reduzindo a emissão de  $\text{NO}_x$  ao longo do tempo (HASSANI; HOSSEINI, 2016). Já os motocicletos das fases M3 e M4, equipados com catalisadores e, em sua grande maioria, com injeção eletrônica de combustível, têm o processo de combustão otimizado. Esse processo ocasiona o aumento de temperatura na câmara de combustão, fator responsável pela formação do  $\text{NO}_x$ , sendo esse reduzido posteriormente no sistema de pós-tratamento (catalisador), sendo que, mesmo com deterioração da combustão, seus níveis de emissão superam as fases anteriores. Assim, as emissões não apresentam uma correlação somente com os parâmetros usados na regressão dos dados, conforme evidenciado na análise de componentes principais (FIGURA 28), porém, como o padrão das análises adotado usa os dados ano a ano dos motocicletos, pode-se adotar a mesma premissa dos compostos anteriores. Os resultados apresentados, para fins de comparação, são todos com gasolina A22-S50. Observam-se, ainda, nessa figura, os coeficientes de variação de cada amostra, identificados com uso do

símbolo “asterisco”. A maior variação observada foi para o motociclo da fase M1 a gasolina (M1-G-02) em torno de 10%.

As informações de outros compostos e combustíveis foram disponibilizadas no APÊNDICE 7.

FIGURA 29 – EMISSÃO DE NO<sub>x</sub> E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO



FONTE: O autor (2017).

Nas subseções seguintes apresentam-se detalhes da elaboração dos fatores de emissão de cada fase e composto.

#### 4.1.1.1 Motociclos pertencentes às fases M3 e M4

##### A) Fatores de emissão para o CO

As fases M3 e M4 tiveram início, respectivamente, em 2009 e 2014, sendo aplicados os mesmos limites de emissões com o diferencial de a fase M4 utilizar outro ciclo de ensaios. Porém, como a legislação determinou o uso do ciclo WMTC apenas aos novos modelos homologados após 2014, a fase M3 se perpetuou até o final de 2015, pois, a partir de 2016, o uso do ciclo WMTC e a implantação de novos limites foram obrigatórios para todos os modelos. Observa-se que os limites de emissão para o CO não foram alterados com a implantação da fase M4, permanecendo em 2,0 g km<sup>-1</sup>.

A TABELA 11 apresenta os valores das emissões de CO (g km<sup>-1</sup>) para veículos novos da fase M3 nos anos de 2009 a 2015 empregados no IEV como

fatores de emissão. Esses dados são provenientes de ensaios de homologação e conformidade de produção de veículos novos.

TABELA 11 – EMISSÃO DE CO (g Km<sup>-1</sup>) EM MOTOCICLOS NOVOS POR ANO DE FABRICAÇÃO

Combustível	Anos de Fabricação						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gasolina	1,09	0,74	0,70	0,57	0,53	0,55	0,59
Flex - gasolina	0,75	0,75	0,76	0,74	0,67	0,67	0,70
Flex - etanol	0,58	0,58	0,68	0,90	0,81	0,81	0,77

FONTE: Adaptado de MMA (2014) e CETESB (2015).

Como as informações disponíveis sobre a degradação dos sistemas de pós-tratamento não são suficientes para auxiliar na determinação dos fatores de emissão em motocicletas (DRÖGE et al., 2011), realizaram-se testes adicionais para verificar o potencial das emissões em veículos com sistemas de controle degradados. Para essa análise, realizaram-se ensaios em quatro motocicletas coletando as emissões antes do catalisador. Ainda, uma das motos foi testada com uma falha induzida, com a sonda lambda desligada, fornecendo informações do patamar de emissões combinado com a degradação do catalisador e do sistema de controle da combustão. Observou-se que a operação desse motociclo nas condições citadas não apresentou desvios como falhas ou perda de potência, sendo constatado apenas em alguns dos ciclos realizados o acendimento da luz do sistema de injeção nos instantes finais do ensaio. A TABELA 12 apresenta os valores das emissões pré-catalisador (g km<sup>-1</sup>) e emissão no motociclo ano de fabricação 2009 com simulação de falha (sonda lambda desligada). Adicionalmente mostram-se os valores potenciais de emissão com aplicação do fator de emissão com falha.

TABELA 12 – EMISSÃO DE CO (g Km<sup>-1</sup>) ANTES DO CATALISADOR E COM SIMULAÇÃO DE FALHA

Ano fabricação	Motor (cm <sup>3</sup> )	Emissão pré-cat <sup>1</sup>		Emissão pré-cat +F <sup>2</sup>		Com fator (2,66) <sup>3</sup>	
		CO	incerteza	CO	incerteza	CO	incerteza
2009	125	2,30	0,05	6,10	0,11	6,10	0,12
2010	300	6,97	0,18	-	-	18,50	0,37
2011	150	2,38	0,10	-	-	6,31	0,13
2013	250	3,01	0,05	-	-	8,01	0,16
Média ponderada <sup>4</sup>		2,68	0,12	NA	NA	7,12	0,20

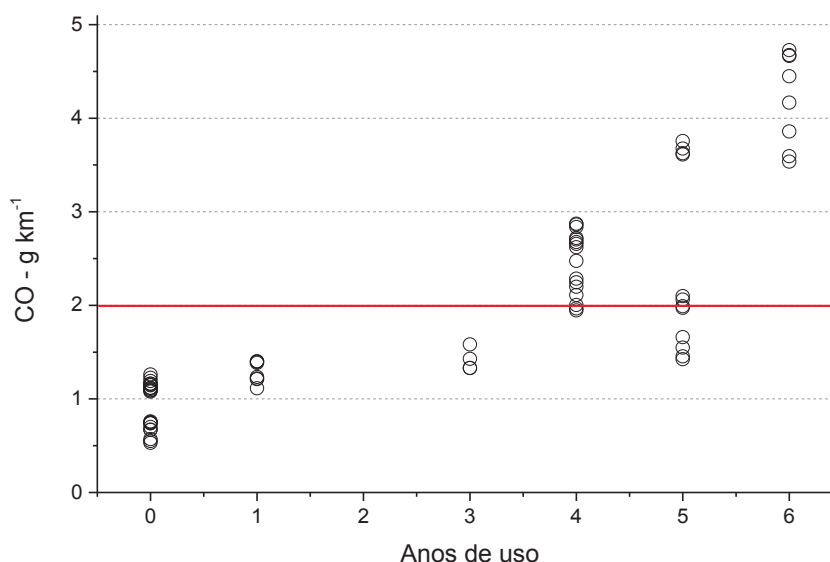
FONTE: O autor (2017).

NOTAS: <sup>1</sup> – Emissões antes do catalisador; <sup>2</sup> – Emissão antes do catalisador e simulação de falha (sonda lambda desligada); <sup>3</sup> – Aplicação do fator de falha; <sup>4</sup> – Ponderação de acordo com vendas por cilindrada no período conforme anuário ABRACICLO (2016).

O fator de emissão com falha foi determinado pela razão das emissões no motociclo 2009 antes do catalisador com falha e emissões antes do catalisador sem falha. O valor final para o denominado veículo alto emissor (AE) resultou em  $7,12 \pm 0,20 \text{ g km}^{-1}$ . O mesmo procedimento foi aplicado aos demais compostos (THC e  $\text{NO}_x$ ).

Os dados experimentais de emissão, para o CO, das amostras pertencentes as fases M3 e M4, utilizadas no presente estudo, são apresentados na FIGURA 30. As amostras estão ordenadas de acordo com a idade do veículo, condição que representa também o acúmulo de quilometragem com seu uso. As condições de intensidade de uso adotadas são as sugeridas pelo IEV (MMA, 2014) e se encontram no ANEXO 1, em que são apresentados, ainda, os fatores de correção para as distâncias anuais percorridas, conforme vendas de combustíveis e estimativa do uso de gasolina e etanol pelos veículos da frota *flex fuel*. Na figura citada, a linha em vermelho destaca o limite de homologação dos veículos da fase M3 e M4 ( $2,0 \text{ g km}^{-1}$ ).

FIGURA 30 – EMISSÃO DE ACORDO COM ANOS DE USO



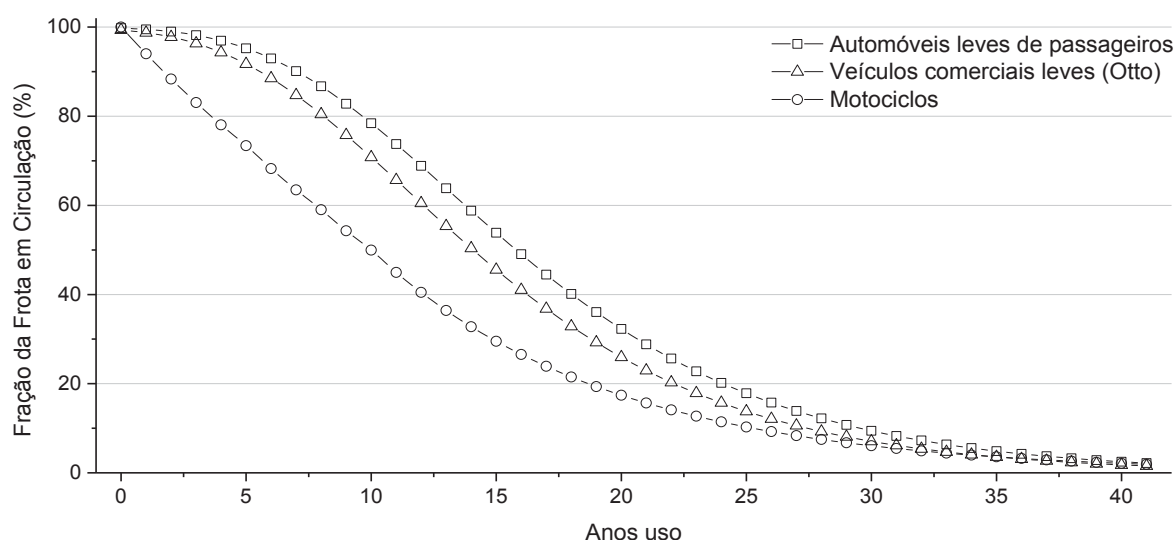
FONTE: O autor (2017).

Estudos na Europa estimam que motocicletas da fase Euro III, equivalente à fase M3 brasileira, possuem durabilidade das emissões, ou seja, atendem aos limites de homologação, entre 4 a 5 anos (NTZIACHRISTOS et al., 2006), porém a estimativa de acúmulo de quilometragem é inferior ao padrão brasileiro. Nos resultados apresentados, observa-se a mesma tendência com motocicletas superando

o limite de emissão regulamentar ( $2,0 \text{ g km}^{-1}$ ) imposto aos veículos novos a partir do quarto ano de uso. As emissões ponderadas do quarto ano são de  $2,40 \pm 0,10 \text{ g km}^{-1}$ , no mesmo patamar dos valores médios apresentados na TABELA 12 antes do catalisador ( $2,68 \pm 0,12 \text{ g km}^{-1}$ ). Ressalta-se que a legislação brasileira não contemplava uma regulamentação sobre durabilidade de emissões para essa categoria de veículo até a implantação da fase M4.

Segundo dados do IEV (MMA, 2014), os motocicletas apresentam uma vida útil média inferior aos automóveis, fato relacionado a um menor valor agregado e durabilidade dos produtos. Conforme a FIGURA 31, que representa o sucateamento da frota de veículos, estima-se que, após o décimo ano de uso, apenas 50% dos motocicletas de um mesmo ano de fabricação esteja em uso.

FIGURA 31 – CURVAS DE SUCATEAMENTO - VEÍCULOS CICLO OTTO



FONTE: Adaptado de MMA (2014).

Ainda, a falta de implantação de um sistema de inspeção veicular eficiente nas cidades brasileiras ocasiona uma deterioração de forma mais acentuada das emissões na frota nacional, pois falhas deixam de ser diagnosticadas, além da falta de informações estatísticas de seu perfil de uso e emissões (CARVALHO, 2011; BRANCO, F. C. et al., 2014; BRANCO, 2015).

Devido à falta de informações e à recente entrada em vigor dos limites M3/M4, adotou-se, como estimativa de uma emissão máxima para os veículos dessa fase, os parâmetros do sistema de inspeção veicular da cidade de São Paulo.

Segundo informações desse sistema, que operou entre 2008 e 2012, efetuando mais de 15 milhões de vistorias, os veículos com mais de dez anos de uso apresentaram uma taxa de reprovação inicial de aproximadamente 35% (BRANCO, F. C. et al., 2014; BRANCO, 2015). O processo de inspeção veicular utiliza um método simples de medição dos gases de escapamento em condições estáticas e sem carga, com objetivo de identificar altos emissores. Para estimar a emissão máxima dos motocicletos deste estudo adotou-se como parâmetro o fator de emissões do décimo primeiro ano de uso (peso 0,65) combinado com o valor de emissão dos motocicletos com catalisador degradado e falha (peso 0,35), apresentados na TABELA 12, representando a porcentagem da frota com altas emissões. O valor de 35% de degradação das emissões na frota com mais de dez anos de uso baseou-se nos dados da inspeção veicular de São Paulo (BRANCO, F. C. et al., 2014).

Para estimar os fatores de emissão nos motocicletos M3 e M4 foram utilizados como combustíveis a gasolina A22-S200 para os ensaios da fase M3 e A22-S50 para a fase M4. Esses combustíveis representam a especificação utilizada durante o período de homologação dessas fases, propiciando a utilização combinada dos dados dos motocicletos em condição de uso com os dados do inventário.

Dos valores de emissão das amostras obtidos em laboratório nesta pesquisa, subtraíram-se as emissões correspondentes aos motocicletos novos, de acordo com o ano de fabricação. Os dados de emissão dos motocicletos novos são os apresentados pelo IEV e pela CETESB (MMA, 2014; CETESB, 2016). O resultado obtido foi dividido pelo acúmulo de quilometragem estimado de acordo com intensidade de uso do IEV no ano de ensaio da amostra. O valor médio ponderado obtido de acordo com as vendas por volume de deslocamento dos motores foi de  $3,16 \times 10^{-5} \text{ g km}^{-2}$ , denominado fator calculado, que é o incremento médio das emissões por acúmulo de rodagem. Efetuando-se uma analogia com a representação do fator de incremento para veículos leves de passageiros do IEV, em que a degradação é apresentada para um acúmulo de 80.000 km, teremos o valor de  $2,53 \text{ g km}^{-1}$ . Para os veículos leves, o IEV apresenta um valor médio de  $0,263 \text{ g km}^{-1}$  a cada 80.000 km acumulados, pois, de acordo com a legislação vigente, essa categoria de veículos deve garantir o atendimento dos limites de emissões até os 80.000 km de uso.

Para cada ano de fabricação dos motocicletos das fases M3 e M4, utilizou-se o fator de emissão do IEV, acrescido do fator calculado e multiplicado pelas

estimativas de acúmulo de quilometragem propostas pelo IEV a cada ano de uso. Após o décimo ano de uso, o valor encontrado foi combinado com o fator de emissão em condições degradadas da TABELA 12, equivalente a um veículo alto emissor, nas proporções de 65% e 35%, respectivamente, para compor o teto máximo de emissões para o motociclo do ano de fabricação em questão. Aos anos seguintes em que o teto de emissões foi superado, o fator de emissões foi mantido constante e igual ao valor máximo de emissões estipulado.

De forma geral, o cálculo do fator de emissões é dado por

$$FE_i^{ano} = fe_0 + fc \times Iu_i \quad (20)$$

em que:

$FE_i^{ano}$  – fator de emissão para o ano de fabricação  $x$ , com  $i$  anos de uso ( $g\ km^{-1}$ );

$fe_0$  – valor do fator de emissões do veículo quando novo ( $g\ km^{-1}$ );

$fc$  – fator calculado ( $g\ km^{-2}$ );

$Iu_i$  – intensidade de uso acumulada para o ano  $i$  (km).

A equação é aplicada a cada ano de uso enquanto for menor ou igual ao fator máximo de emissão para o ano de fabricação  $x$ . Após superar esse valor as emissões tornam-se constantes ao longo dos anos, com fator de emissão igual ao fator máximo de emissões.

O valor do fator máximo de emissão é calculado por:

$$FM_{ano} = (FE_{i=11}^{ano} \times 0,65) + (AE \times 0,35) \quad (21)$$

em que:

$FM_{ano}$  – fator de emissão máximo para o ano de fabricação  $x$  ( $g\ km^{-1}$ );

$FE_{i=11}^{ano}$  – fator de emissão para o ano de fabricação  $x$  com 11 anos de uso ( $g\ km^{-1}$ );

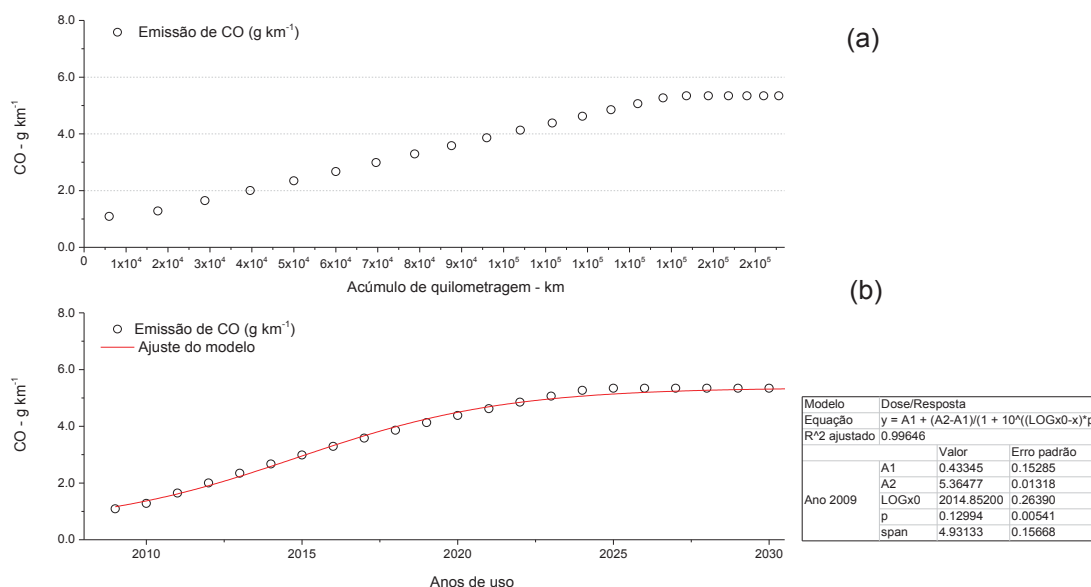
$AE$  – valor das emissões do veículo alto emissor ( $g\ km^{-1}$ ).

Na FIGURA 32 são apresentados os resultados obtidos para os motociclos da fase M3 fabricados no ano de 2009 com uso de gasolina. Na FIGURA 32 (a), observa-se o perfil das emissões que têm um comportamento linear com o aumento do acúmulo de quilometragem até atingir o ponto de estabilização. Já na FIGURA 32 (b), observa-se o perfil das emissões durante os anos de uso e, ainda, o ajuste do



modelo (linha vermelha) para determinação de uma equação que vai fornecer o fator de emissões de acordo com o ano desejado. O valor inicial de emissão, conforme dados IEV, foi de  $1,09 \text{ g km}^{-1}$  e o valor máximo estimado para esses motocicletas ficou em  $5,34 \text{ g km}^{-1}$ , atingido no ano de 2025. Observam-se, ainda, na mesma figura, os dados da regressão, com a equação que permite calcular os fatores de emissão com entrada do ano em que se deseja conhecer o fator. O coeficiente de determinação para o ajuste em questão foi de 0,996.

FIGURA 32 – EMISSÕES E AJUSTE DOS DADOS - FASE M3 FABRICADOS EM 2009

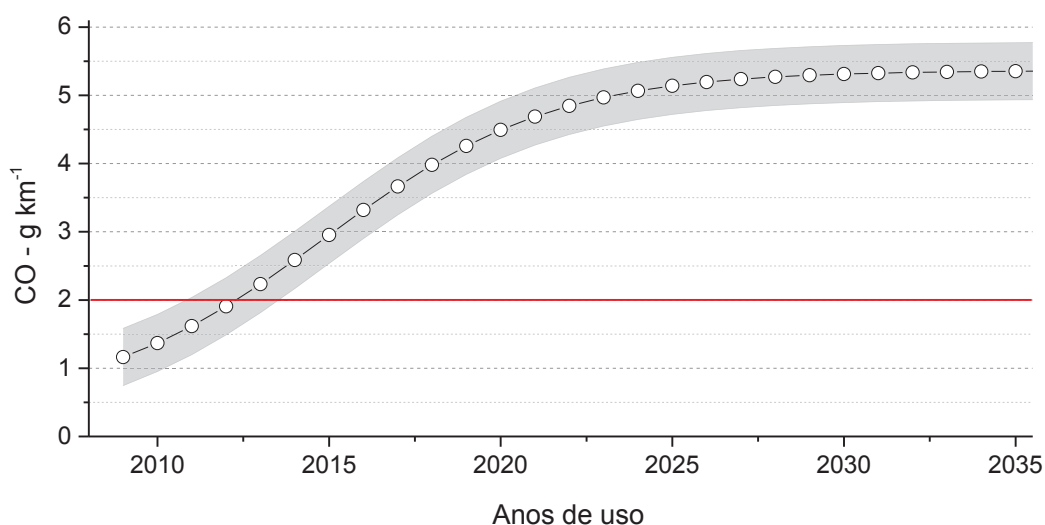


FONTE: O autor (2017).

Com os dados da incerteza combinada do tipo A dos ensaios realizados ( $\pm 0,40 \text{ g km}^{-1}$ ) e os valores de erro da equação de regressão, calcularam-se as estimativas de variação nas projeções dos fatores de emissão para os motocicletas da fase M3.

A FIGURA 33 apresenta as estimativas de emissão e incerteza para o CO, de acordo com os anos de uso, para os motocicletas fabricados em 2009. Observa-se que as emissões ultrapassam o limite estabelecido pela legislação (linha destacada em vermelho) a motocicletas novos após o quarto ano de uso. O valor médio de incerteza ao longo da curva foi de  $0,41 \text{ g km}^{-1}$ .

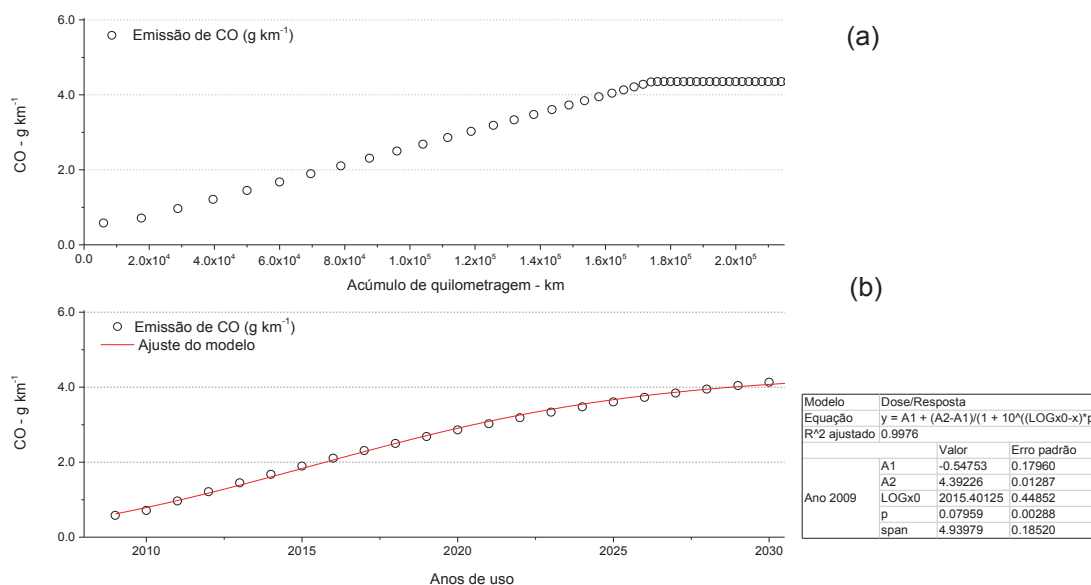
FIGURA 33 – EMISSÃO DE CO E INCERTEZA EM RELAÇÃO AOS ANOS DE USO



FONTE: O autor (2017).

O mesmo procedimento foi aplicado aos motocicletos *flex fuel* com uso de etanol hidratado, obtendo-se um fator calculado de  $2,19 \times 10^{-5} \text{ g km}^{-2}$ , equivalente a  $1,75 \text{ g km}^{-1}$  para 80.000 km acumulados para o uso de etanol. A FIGURA 34 (a) apresenta a aplicação do fator calculado nos motocicletos *flex fuel* da fase M3 fabricados no ano de 2009 com uso de etanol hidratado com acúmulo de quilometragem. Ainda, demonstram-se o perfil das emissões e o ajuste do modelo de acordo com anos de uso após sua fabricação, FIGURA 34 (b).

No APÊNDICE 8, apresentam-se os coeficientes das equações para estimar os fatores de emissão e incerteza para os anos e fases do PROMOT abrangidos por esse estudo.

FIGURA 34 – EMISSÕES E AJUSTE DOS DADOS - MOTOCICLOS *FLEX* COM USO DE ETANOL

FONTE: O autor (2017).

## B) Fatores de emissão para o THC

As estimativas dos fatores de emissão para o THC seguiram as premissas descritas para o CO. Os valores experimentais das emissões de THC antes do catalisador, que irão subsidiar as informações de degradação dos sistemas de pós-tratamento e simulação de envelhecimento, são apresentados na TABELA 13. Observa-se que os motocicletos com deslocamento volumétrico menor que 150 cm<sup>3</sup> não ultrapassam os limites de emissões da legislação (0,80 g km<sup>-1</sup>), mesmo quando simulada uma condição sem catalisador mais falha. Já para os motores acima desse volume, que possuem limite de emissão de 0,30 g km<sup>-1</sup> (IBAMA, 2011), os valores observados superam esse limite. Porém os valores finais são ponderados, utilizando-se o fator de vendas, sendo que aproximadamente 87% dos motocicletos vendidos no período possuía motor com volume de deslocamento menor que 150 cm<sup>3</sup>. Ponderando-se dessa maneira os limites de emissão, obtém-se um valor de 0,735 g km<sup>-1</sup>, maior que as emissões observadas e estimadas nos experimentos apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – EMISSÃO DE THC (g Km<sup>-1</sup>) ANTES DO CATALISADOR E COM SIMULAÇÃO DE FALHA

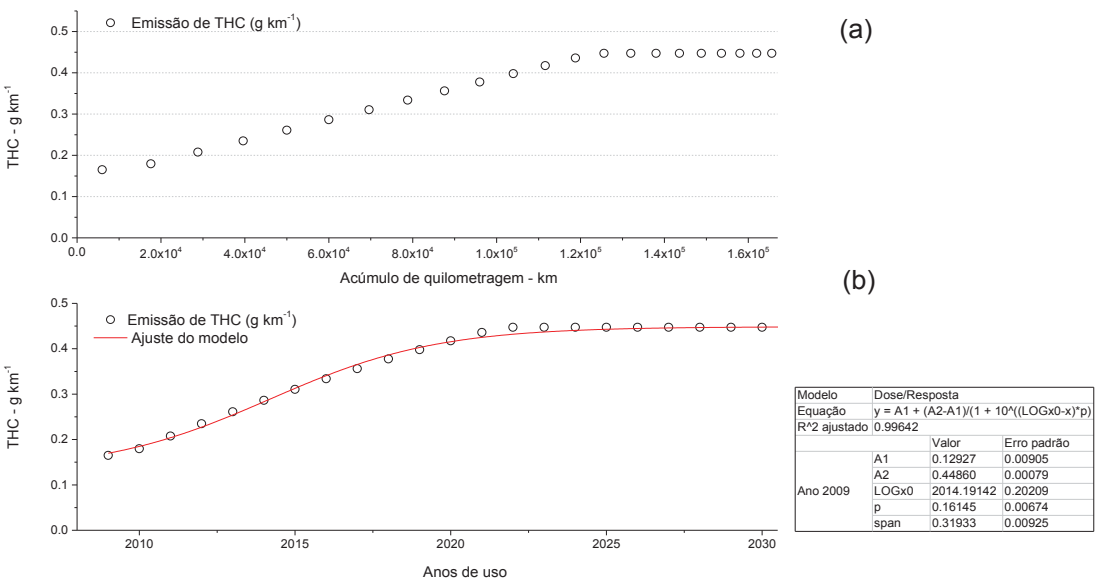
Ano fabricação	Motor (cm <sup>3</sup> )	Emissão pré-cat <sup>1</sup>		Emissão pré-cat +F <sup>2</sup>		Com fator (1,08) <sup>3</sup>	
		THC	incerteza	THC	incerteza	THC	incerteza
2009	125	0,508	0,008	0,547	0,004	0,547	0,009
2010	300	0,571	0,029	-	-	0,614	0,010
2011	150	0,424	0,015	-	-	0,456	0,007
2013	250	0,379	0,002	-	-	0,409	0,006
Média ponderada <sup>4</sup>		0,467	0,018	NA	NA	0,503	0,011

FONTE: O autor (2017).

NOTAS: <sup>1</sup> – Emissões antes do catalisador; <sup>2</sup> – Emissão antes do catalisador e simulação de falha (sonda lambda desligada); <sup>3</sup> – Aplicação do fator de falha; <sup>4</sup> – Ponderação de acordo com vendas no período conforme anuário ABRACICLO (2016).

Utilizando-se das premissas adotadas, obteve-se um fator calculado de  $2,43 \times 10^{-6}$  g km<sup>-2</sup>, equivalente a 0,19 g km<sup>-1</sup> em 80.000 km. Na FIGURA 35 observam-se os valores estimados para os fatores de emissão de acordo com acúmulo de quilometragem (a) e com os anos de uso (b) para motocicletas dedicadas à gasolina fabricados em 2009. São, ainda, apresentados os parâmetros da regressão que permite o cálculo do fator de emissões para esse ano de fabricação com entrada no modelo do ano desejado. O valor máximo de emissões estimado para os motocicletas fabricados no ano de 2009 foi de  $0,447 \pm 0,021$  g km<sup>-1</sup> após o ano de 2022, inferior ao limite de emissões (0,80 g km<sup>-1</sup>) para motocicletas novos com motores de até 150 cm<sup>3</sup>.

FIGURA 35 – EMISSÕES DE THC E AJUSTE DE DADOS - ANO DE FABRICAÇÃO DE 2009

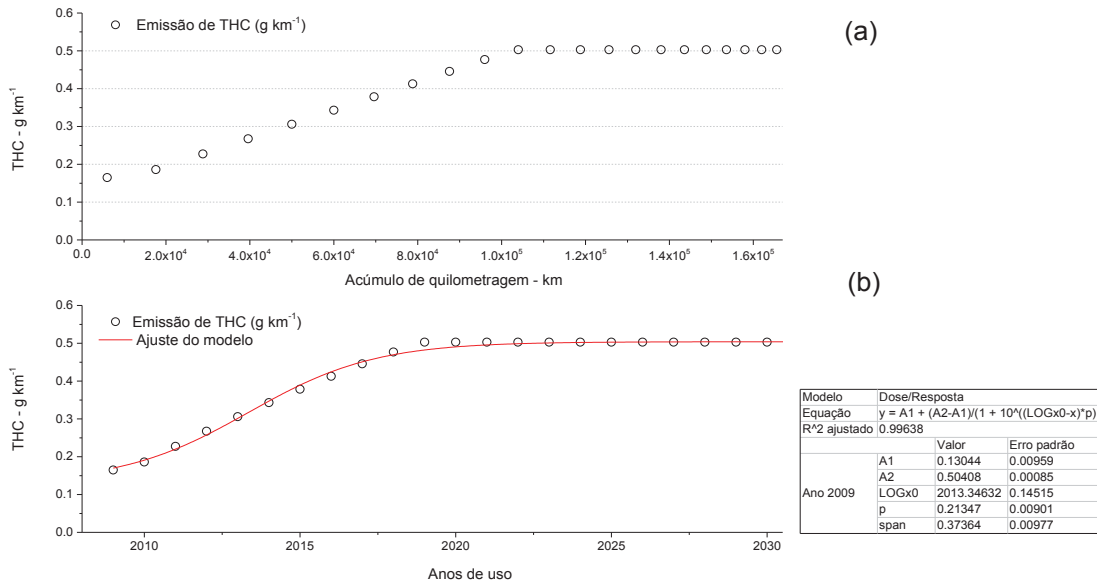


FONTE: O autor (2017).

Quanto ao uso de etanol nos veículos *flex fuel*, observou-se um valor médio das emissões de  $0,233 \pm 0,019 \text{ g km}^{-1}$ , enquanto com uso de gasolina nos mesmos veículos a média foi de  $0,198 \pm 0,013 \text{ g km}^{-1}$ . Analisando as emissões de modo contínuo em motociclo *flex fuel* com uso de etanol, observou-se que as emissões de THC são superiores nos primeiros instantes de funcionamento do motor, nos 200 s iniciais da fase transiente fria, mudando de perfil após atingir uma condição estabilizada quente (DAEMME et al., 2016C).

Aplicando os dados obtidos e informações das emissões iniciais e intensidade de uso no método descrito para determinação do fator calculado, chegou-se ao valor de  $3,56 \times 10^{-6} \text{ g km}^{-2}$ , equivalente a  $0,29 \text{ g km}^{-1}$  para um acúmulo de 80.000 km. Com aplicação do fator e intensidade de uso nas emissões iniciais dos motociclos *flex fuel* com uso de etanol, foram obtidas as equações para determinação dos fatores de emissão. Na FIGURA 36, observam-se os dados obtidos para motociclos fabricados no ano de 2009, com a degradação das emissões por km (a) e por ano (b), juntamente com o ajuste do modelo para esse ano de fabricação utilizando-se etanol. Observa-se, ainda, que uma emissão máxima estimada para esse ano de fabricação foi de  $0,503 \text{ g km}^{-1}$ , atingida no ano de 2019.

FIGURA 36 – EMISSÕES DE THC COM ACÚMULO DE QUILOMETRAGEM (A) E REGRESSÃO DE DADOS (B) COM USO DE ETANOL HIDRATADO



FONTE: O autor (2017).

### C) Fatores de emissão para o NO<sub>x</sub>

Para estimar as emissões máximas, utilizou-se o mesmo método e premissas apresentados, empregando os resultados dos experimentos antes do catalisador e de simulação de falha em motocicletas. Na TABELA 14, observam-se os valores de emissão para o NO<sub>x</sub> antes do catalisador e com simulação de falha. A simulação de falha da sonda lambda afeta a eficiência da combustão, reduzindo, assim, a formação de NO<sub>x</sub> quando se compara aos valores pré-catalisador sem falha, aumentando as emissões de CO e THC, conforme observado.

TABELA 14 – EMISSÃO DE NO<sub>x</sub> (g Km<sup>-1</sup>) ANTES DO CATALISADOR E COM SIMULAÇÃO DE FALHA

Ano fabricação	Motor (cm <sup>3</sup> )	Emissão pré-cat <sup>1</sup>		Emissão pré-cat +F <sup>2</sup>		Com fator (0,57) <sup>3</sup>	
		NO <sub>x</sub>	Incerteza	NO <sub>x</sub>	Incerteza	NO <sub>x</sub>	Incerteza
2009	125	0,428	0,008	0,240	0,004	0,244	0,008
2010	300	0,463	0,027	-	-	0,264	0,029
2011	150	0,286	0,033	-	-	0,163	0,033
2013	250	0,709	0,002	-	-	0,404	0,014
Média ponderada <sup>4</sup>		0,387	0,033	NA	NA	0,220	0,034

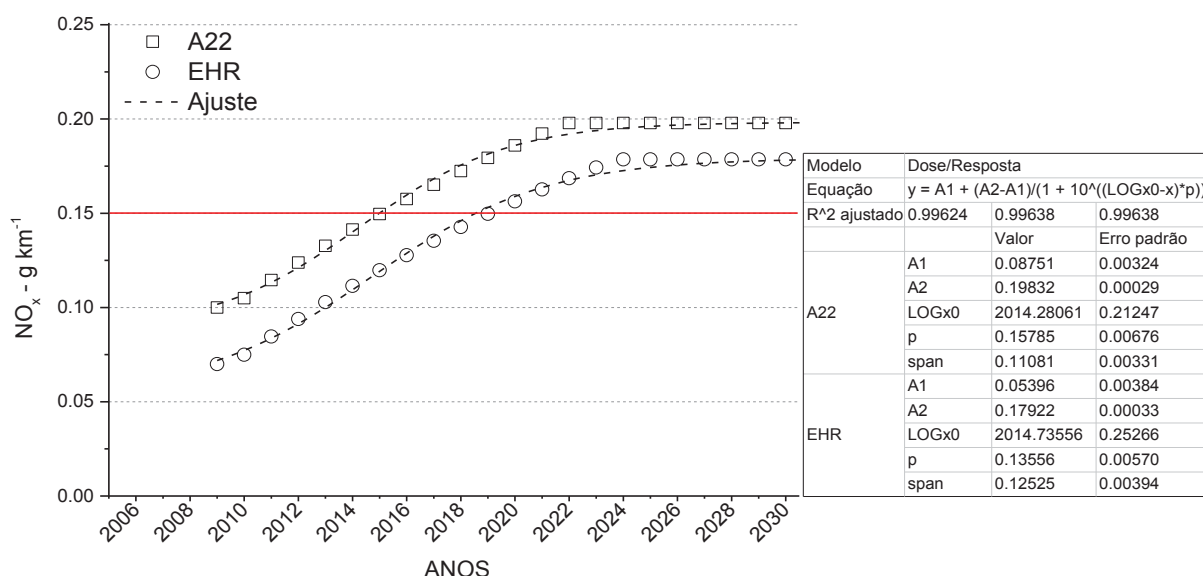
FONTE: O autor (2017).

NOTAS: <sup>1</sup> – Emissões antes do catalisador; <sup>2</sup> – Emissão antes do catalisador e simulação de falha (sonda lambda desligada); <sup>3</sup> – Aplicação do fator de falha; <sup>4</sup> – Ponderação de acordo com vendas no período conforme anuário ABRACICLO (2016).

A combinação dos resultados experimentais com os fatores de emissão dos veículos novos e intensidade de uso resultaram em um fator calculado igual a  $8,27 \times 10^{-7}$  g km<sup>-2</sup>, equivalente a 0,07 g km<sup>-1</sup> para 80.000 km acumulados. Para os veículos *flex fuel* com uso de etanol hidratado, o fator calculado foi de  $8,30 \times 10^{-7}$  g km<sup>-2</sup>.

O perfil das emissões para os motocicletas a gasolina e *flex fuel* fabricados no ano de 2009 são apresentados na FIGURA 37. No exemplo demonstrado, encontram-se as emissões e regressão de dados para motociclo a gasolina e *flex fuel* com uso de etanol. Os motocicletas a gasolina fabricados nesse ano possuem um fator inicial de emissões de 0,10 g km<sup>-1</sup>, sendo o limite de emissões estabelecido para os veículos novos atingido após o sexto ano de uso (linha destacada em vermelho na figura). O limite máximo de emissões projetado para esses veículos foi de  $0,20 \pm 0,01$  g km<sup>-1</sup>. Já os veículos *flex fuel* com uso de etanol (EHR) têm uma emissão inicial estimada em 0,07 g km<sup>-1</sup> e um valor máximo de emissões de  $0,18 \pm 0,01$  g km<sup>-1</sup>.

FIGURA 37 – EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> E AJUSTE DE DADOS - ANO DE FABRICAÇÃO 2009 COM USO DE GASOLINA EHR



FONTE: O autor (2017).

#### 4.1.1.2 Motociclos da fase M2

##### A) Fatores de emissão para o CO

Nos motociclos da fase M2, produzidos entre 2006 e 2008, não se fazia necessária a aplicação de tecnologias como catalisador e/ou injeção eletrônica de combustível devido aos altos limites de emissão aceitos pela legislação vigente naquele período. Assim, a degradação desses veículos não tem influência de sistemas de pós-tratamento, sendo provocada diretamente pelo desgaste e condições de manutenção.

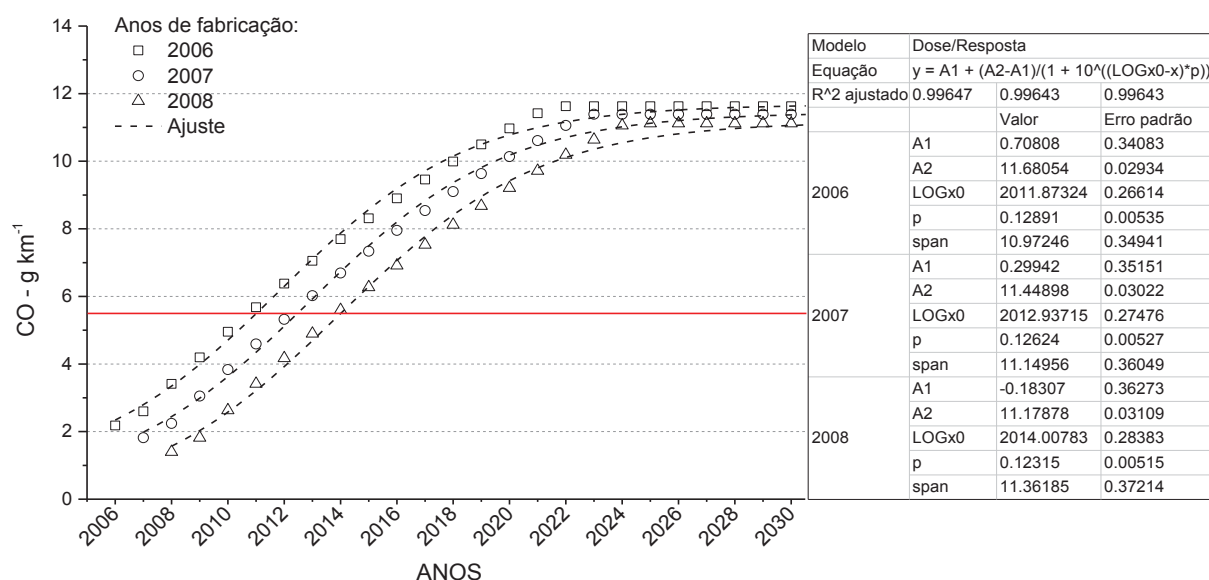
A média ponderada das emissões dos motociclos ensaiados da fase M2, de acordo com as vendas ABRACICLO (2013), foi de  $5,87 \pm 0,42 \text{ g km}^{-1}$ ; do veículo alto emissor foi de  $15,65 \pm 0,42 \text{ g km}^{-1}$ . Os resultados para os motociclos dessa fase foram obtidos com uso de gasolina A22-S200, combustível similar ao usado para homologações durante o período de vigência dessas fases.

Para determinação do fator calculado utilizou-se o mesmo procedimento adotado para os motociclos da fase M3, com alteração apenas no valor do veículo alto emissor. Para as fases M2 e outras em que os veículos não empregavam catalisador, utilizaram-se os dados experimentais das emissões do veículo alto

emissor. Com esses dados, o fator calculado foi de  $7,0 \times 10^{-5} \text{ g km}^{-2}$ , equivalente a  $5,60 \text{ g km}^{-1}$  com acúmulo de 80.000 km.

Com a aplicação do fator calculado e a intensidade de uso foram efetuadas as regressões para ajuste das curvas de emissão dos três anos da fase M2. A FIGURA 38 apresenta as curvas de regressão, além das informações dos coeficientes de determinação e fatores da equação de ajuste e erro. Observa-se, ainda, que o limite de homologação para o CO, regulamentado em  $5,5 \text{ g km}^{-1}$  para essa fase, é superado após o quinto ano de uso para os motocicletas fabricados em 2006.

FIGURA 38 – EMISSÕES DE CO E AJUSTE DE DADOS PARA MOTOCICLOS DA FASE M2



FONTE: O autor (2017).

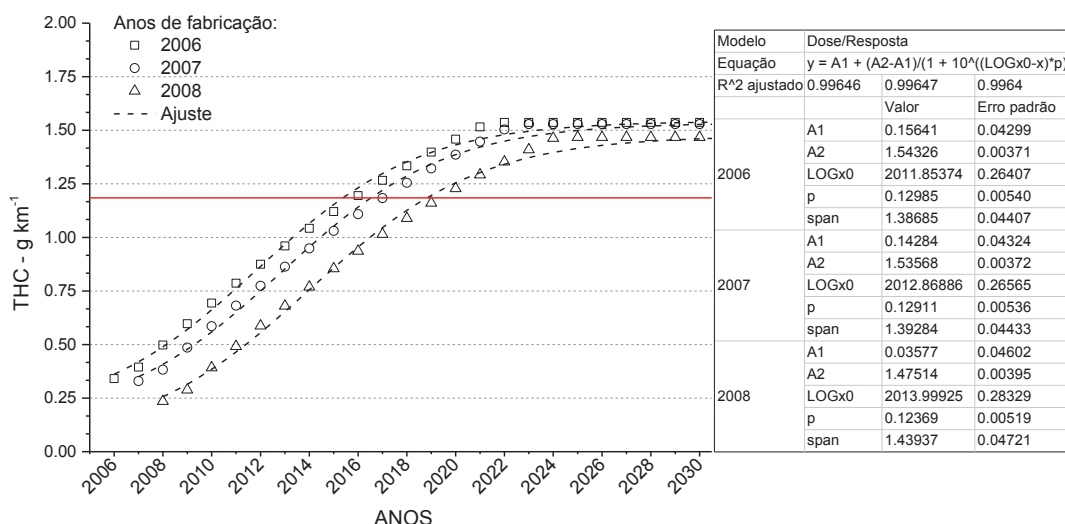
## B) Fatores de emissão para o THC

Nos experimentos realizados com motocicletas da fase M2 obteve-se uma emissão média de  $0,81 \pm 0,13 \text{ g km}^{-1}$ ; na amostra com emissões acima dos limites de inspeção veicular a emissão média foi de  $2,04 \pm 0,13 \text{ g km}^{-1}$ . Aplicando o método proposto, obteve-se um fator calculado de  $8,9 \times 10^{-6} \text{ g km}^{-2}$ , equivalente a  $0,71 \text{ g km}^{-1}$  para 80.000 km acumulados. A FIGURA 39 apresenta os perfis de emissões e dados das equações de regressão. Fazendo-se a ponderação dos limites de emissões de THC para essa fase pelas vendas de motocicletas no período, de acordo



com deslocamento volumétrico, obtém-se um limite ponderado de  $1,17 \text{ g km}^{-1}$ , valor destacado com uma linha vermelha na figura. A emissão máxima estimada para os motocicletos dessa fase foi de aproximadamente  $1,50 \text{ g km}^{-1}$  após o ano de 2022.

FIGURA 39 – EMISSÕES DE THC E AJUSTE DE DADOS PARA FASE M2



FONTE: O autor (2017).

### C) Fatores de emissão para o $\text{NO}_x$

Nos ensaios realizados com as amostras selecionadas, obteve-se um valor médio ponderado de emissão para o  $\text{NO}_x$  de  $0,159 \pm 0,008 \text{ g km}^{-1}$ . Comparando o resultado obtido com os valores da TABELA 15, observa-se uma redução das emissões do composto com o envelhecimento dos veículos, fato já observado por outros autores (TSAI et al., 2000; HASSANI; HOSSEINI, 2016; TSAI; HUANG; CHIANG, 2017), com exceção dos motocicletos fabricados no ano de 2008, que apresentaram resultados mais baixos de emissão nos ensaios de homologação. As emissões no veículo alto emissor foram de  $0,080 \pm 0,008 \text{ g km}^{-1}$ , demonstrando a degradação da qualidade de combustão, com redução das emissões de  $\text{NO}_x$  e aumento nas emissões de CO e THC.

TABELA 15 – EMISSÃO DE  $\text{NO}_x$  ( $\text{g Km}^{-1}$ ) EM MOTOCICLOS NOVOS DA FASE M2 POR ANO DE FABRICAÇÃO

Combustível	Anos de Fabricação		
	2006	2007	2008
Gasolina	0,18	0,17	0,12

FONTE: MMA (2014).

Aplicando os dados, obteve-se um fator calculado de  $5,60 \times 10^{-7} \text{ g km}^{-2}$ . Na combinação desse fator com os dados iniciais de emissão e fator do veículo alto emissor, gerou-se um limite máximo de emissão muito próximo ao fator inicial de emissões. Dessa maneira, esses valores (apresentados na TABELA 16), foram utilizados como fatores de emissão fixos para os veículos dessa fase para estimar as emissões de  $\text{NO}_x$ .

TABELA 16 – FATOR DE EMISSÃO ESTIMADO PARA O  $\text{NO}_x$  ( $\text{g km}^{-1}$ ) EM MOTOCICLOS DA FASE M2 POR ANO DE FABRICAÇÃO

Combustível	Anos de Fabricação		
	2006	2007	2008
Gasolina	0,183	0,176	0,144

FONTE: O autor (2017).

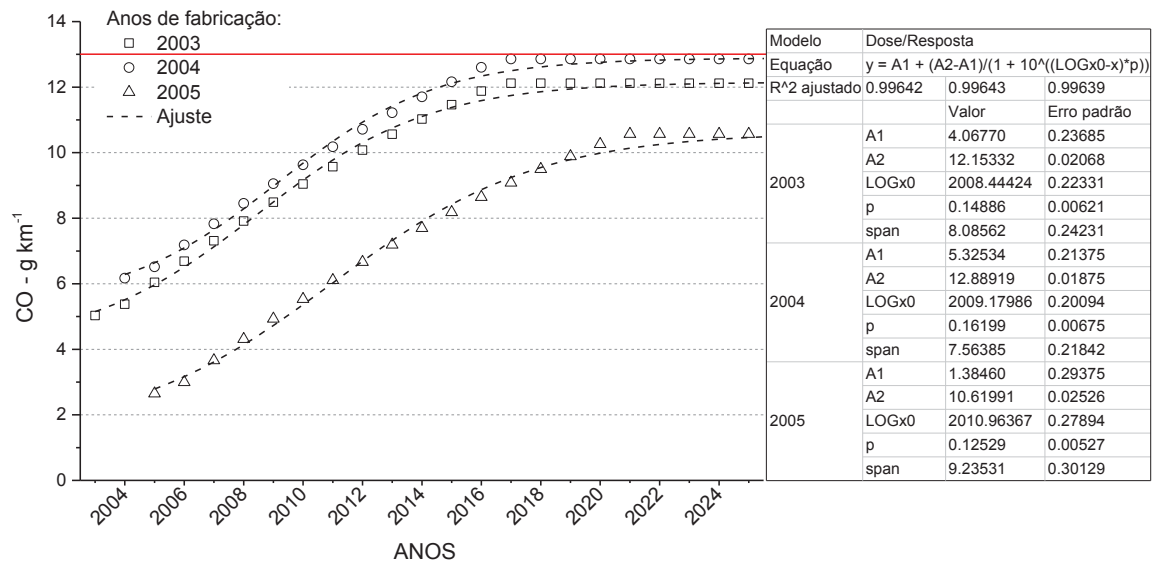
#### 4.1.1.3 Motociclos da fase M1

##### A) Fatores de emissão para CO

Os motociclos da fase M1 possuem as mesmas características da fase M2, ausência de catalisador e uso de carburador para promover a mistura ar/combustível.

O valor médio para emissão de CO nos experimentos executados para os motociclos dessa fase foi de  $9,40 \pm 0,57 \text{ g km}^{-1}$  e o valor de emissão para o veículo alto emissor foi de  $14,15 \text{ g km}^{-1}$ . O fator calculado para essa fase foi de  $5,76 \times 10^{-5} \text{ g km}^{-2}$ , equivalente a  $4,61 \text{ g km}^{-1}$  para 80.000 km rodados. Na FIGURA 40 apresentam-se o perfil das emissões e as equações de ajuste para determinação da estimativa dos fatores de emissão nos motociclos da fase M1. Observa-se que o limite de emissão para os motociclos novos dessa fase do PROMOT ( $13,0 \text{ g km}^{-1}$ ), destacado com uma linha vermelha na figura, não foi atingido nas projeções realizadas.

FIGURA 40 – EMISSÕES DE CO E AJUSTE DE DADOS PARA MOTOCICLOS DA FASE M1

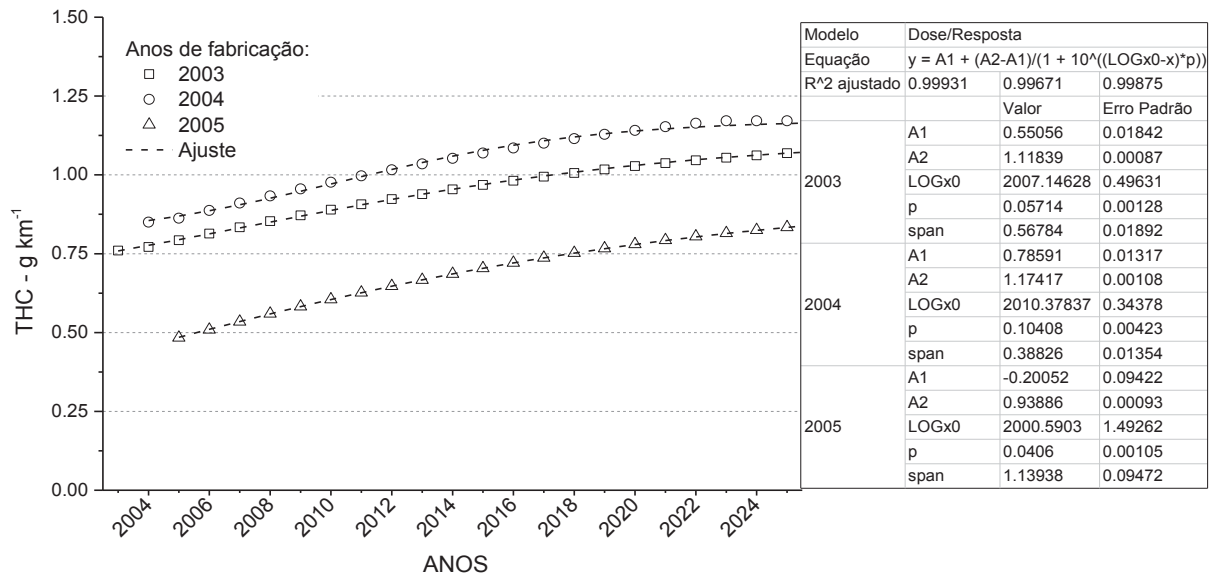


FONTE: O autor (2017).

B) Fatores de emissão para o THC

As amostras ensaiadas da fase M1 apresentaram um valor médio de emissão de  $0,88 \pm 0,05 \text{ g km}^{-1}$  e o veículo alto emissor, de  $1,36 \pm 0,05 \text{ g km}^{-1}$ , valores esses abaixo dos limites de emissão para os veículos novos ( $3,00 \text{ g km}^{-1}$ ). Com aplicação do fator calculado ( $2,11 \times 10^{-6} \text{ g km}^{-2}$ ), efetuaram-se os ajustes das curvas apresentadas na FIGURA 41.

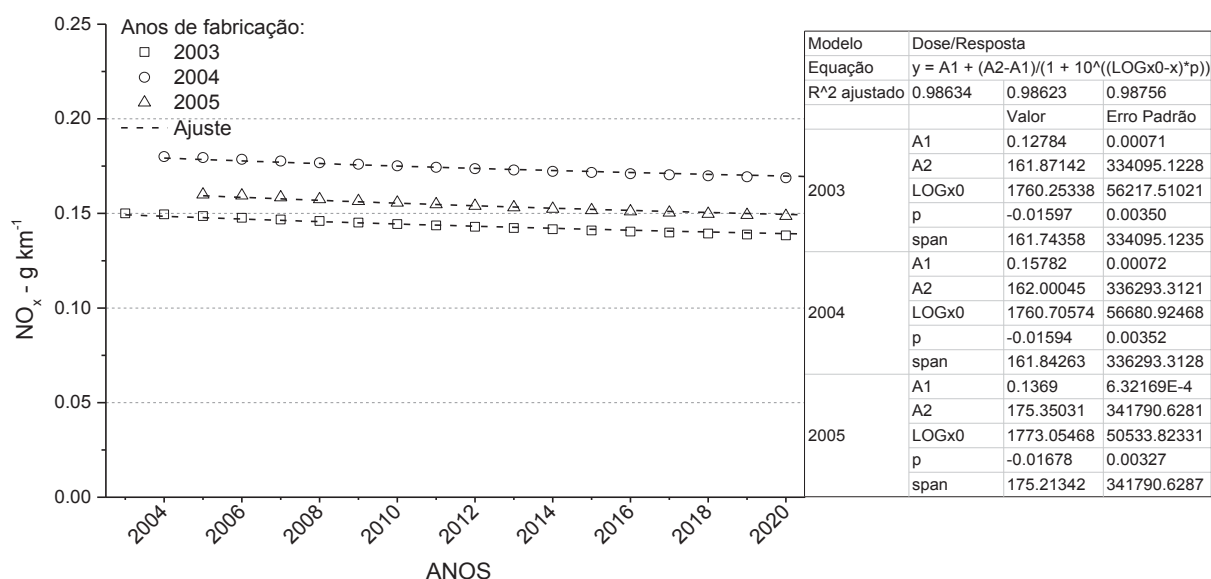
FIGURA 41 – EMISSÕES DE THC E AJUSTE DE DADOS PARA FASE M1



FONTE: O autor (2017).

C) Fatores de emissão de NO<sub>x</sub>

Para os motocicletos da fase M1, fabricados entre 2003 e 2005, o limite de emissão de NO<sub>x</sub> aplicado pela legislação foi de 0,30 g km<sup>-1</sup>. Nos resultados experimentais para os motocicletos da fase M1 obteve-se uma média de 0,150±0,010 g km<sup>-1</sup> e para o veículo alto emissor, de 0,070±0,010 g km<sup>-1</sup>. O fator calculado para essa fase foi de -8,07×10<sup>-8</sup> g km<sup>-2</sup>, indicando a redução das emissões de NO<sub>x</sub> com o desgaste dos motores. Na FIGURA 42 apresentam-se os valores estimados das emissões e os ajustes para determinação dos fatores de emissão. A taxa de redução das emissões entre cada ano de uso é pequena (≈0,5%), implicando em um longo tempo para atingir o nível mínimo de emissões calculado. Para os anos de fabricação dessa fase, os limites inferiores calculados foram de 0,12 g km<sup>-1</sup> para os anos de 2003 e 2005 e 0,14 g km<sup>-1</sup> para o ano de 2004.

FIGURA 42 – EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> E AJUSTE DE DADOS PARA FASE M1

FONTE: O autor (2017).

## 4.1.1.4 Motociclos fabricados antes da vigência do PROMOT

Para os motociclos fabricados antes de 2003, aqui nomeada de fase Pré-PROMOT (PP), os fatores de emissão do IEV foram estimados pelo grupo técnico responsável pela sua elaboração (MMA, 2013, 2014), devido à inexistência de dados experimentais para esses veículos. Os valores utilizados pelo inventário são apresentados na TABELA 17, sendo os mesmos empregados de maneira constante durante os anos de uso dos motociclos.

TABELA 17 – FATORES DE EMISSÃO PARA MOTOCICLOS FABRICADOS ANTES DE 2003

EMISSIONES – g km <sup>-1</sup>		
CO	THC	NO <sub>x</sub>
19,70	2,60	0,10

FONTE: Adaptado de MMA (2014).

Nos experimentos conduzidos neste estudo foram efetuados ensaios para veículos dessa fase, sendo testados dois veículos com nível de emissões dentro dos parâmetros da inspeção veicular e um veículo considerado alto emissor. A combinação da média ponderada entre as emissões dos veículos com emissão normal (peso 65%) e alto emissor (peso 35%), com uso de gasolina A22-S800, foi

utilizada como estimativa do fator de emissões para os veículos fabricados antes do ano de 2003. Seguindo o modelo do IEV, utilizou-se o valor adotado de maneira constante ao longo da vida dos motocicletos dessa fase.

A TABELA 18 apresenta a estimativa dos fatores de emissão obtidos. Observa-se uma redução mais significativa nas emissões de CO e THC, quando comparadas com os valores sugeridos pelo IEV.

TABELA 18 – FATORES DE EMISSÃO PARA MOTOCICLOS FABRICADOS ANTES DE 2003

Dados	EMISSIONES – g km <sup>-1</sup>		
	CO	THC	NO <sub>x</sub>
Fator emissão	15,89	1,37	0,090
U <sub>A</sub>	0,54	0,04	0,004

FONTE: O autor (2017).

#### 4.1.1.5 Determinação do Fator de emissão para o NMHC

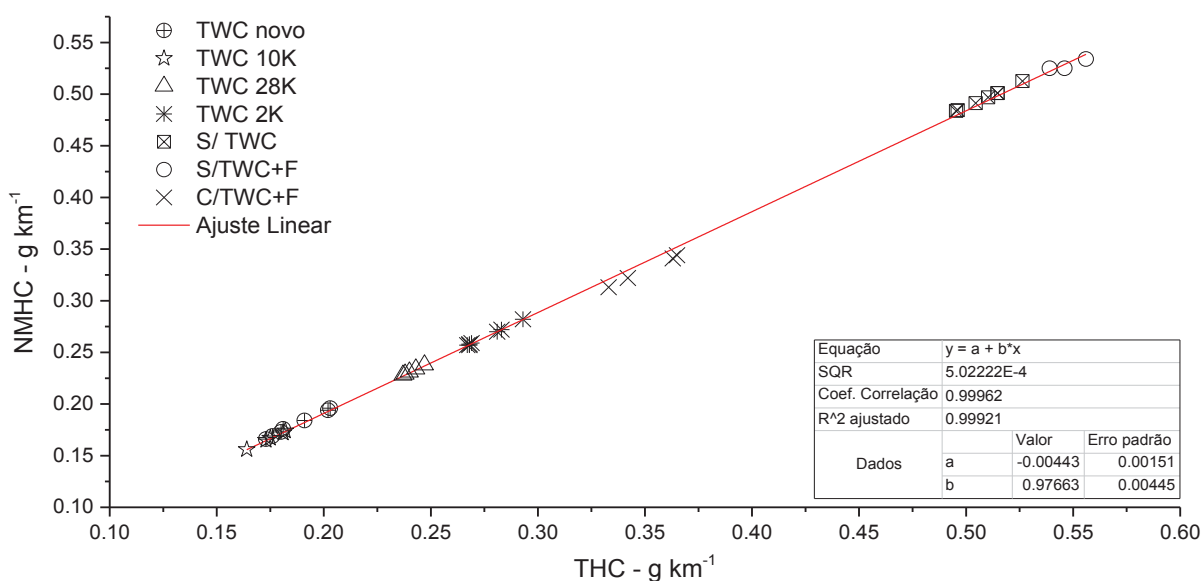
Os hidrocarbonetos do tipo não metano não são um requisito de medição para os ensaios regulamentares em motocicletos na legislação nacional e internacional, não havendo, assim, uma base de dados sobre essas emissões. Para estimar o valor das emissões de NMHC, o IEV (MMA, 2014) aplicou a razão de CH<sub>4</sub>/THC=0,15, utilizando como referência Borsari (2005). Porém, na bibliografia citada (BORSARI, 2005), observa-se um fator de 0,249 para essa relação – valor calculado em veículos leves de passageiros que utilizam gasolina com 22% etanol anidro. Dessa forma, as estimativas de NMHC do IEV para os motocicletos usam um fator que não é específico à classe de veículos em questão, aumentando a possibilidade de erros sistemáticos nas projeções efetuadas.

Em todos os experimentos de motocicletos realizados nesta pesquisa, as emissões de CH<sub>4</sub> foram medidas de acordo com o preconizado pela norma brasileira para veículos leves (ABNT, 2012a). Subtraindo as emissões de metano do total de hidrocarbonetos, determinou-se o valor de emissão dos hidrocarbonetos do tipo não metano.

Para determinar o fator de emissão de NMHC, buscou-se uma correlação de suas emissões com as emissões de THC. Para verificar a consistência da relação foi observado o comportamento entre as emissões de THC e NMHC em diferentes condições de operação de um mesmo motociclo, com objetivo de verificar a linearidade dessas emissões com a mudança do perfil de emissões, simulando

assim a degradação da amostra. Na FIGURA 43 demonstram-se os resultados de um motociclo fase M3 do PROMOT (M3-G-08), com motor de 125 cm<sup>3</sup> e diferentes condições de operação, sendo elas: com catalisador de três vias novo (TWC novo); com o seu catalisador original, com aproximadamente 2.000 km de uso (TWC 2K); com uso de um catalisador com 10.000 km acumulados (TWC 10K); com uso de catalisador com 28.000 km acumulados (TWC 28K); sem uso de catalisador (S/ TWC); sem uso de catalisador e com uma falha no sistema de injeção (sonda lambda desligada) (S/TWC+F); com catalisador original e uma falha no sistema de injeção (sonda lambda desligada) (C/TWC+F). É possível observar que mesmo com as diferentes condições de operação gerando diferentes níveis de emissões, a relação entre as emissões de NMHC/THC mantém-se constante, onde 99,9% das emissões de NMHC podem ser explicadas pelas emissões de THC (coeficiente de correlação ajustado). Nessa figura, ainda, apresenta-se o valor do somatório dos quadrados dos resíduos (SQR) e o coeficiente de correlação (Pearson).

FIGURA 43 – RELAÇÃO NMHC/THC EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

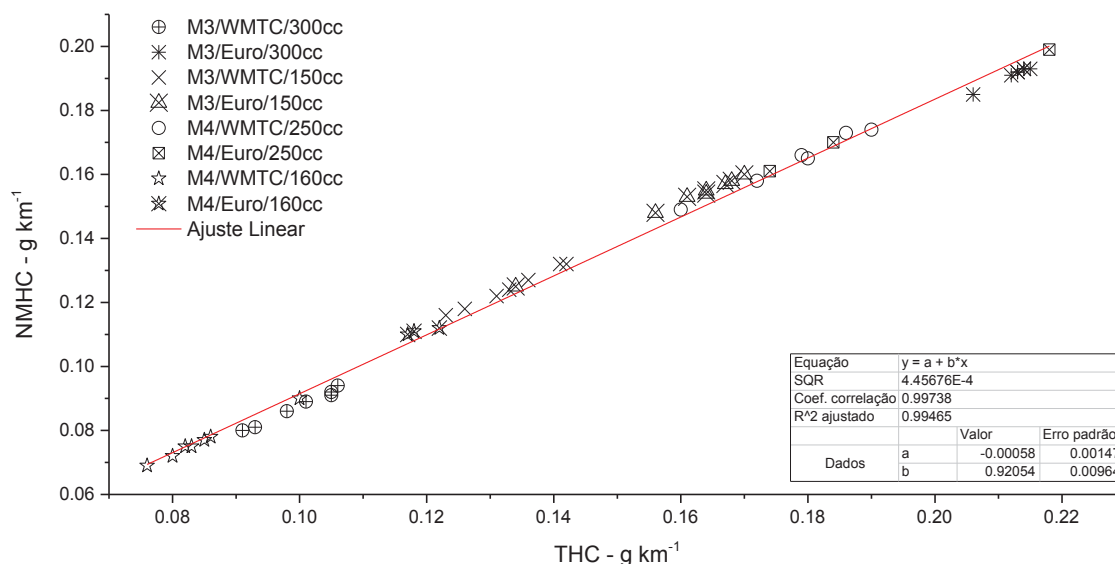


FONTE: O autor (2017).

Com objetivo de verificar o efeito da mudança de regime de ensaio na relação das emissões de NMHC/THC, realizaram-se comparações entre quatro amostras do programa de testes, sendo selecionados motociclos com diferentes motorizações e fases do PROMOT, utilizando os ciclos Euro e WMTC. Na FIGURA 44 onde são apresentados os resultados, observa-se que, mesmo com mudança

nas condições de ensaio e uso de motores com diferentes deslocamentos volumétricos, a relação entre as emissões dos compostos se manteve linear.

FIGURA 44 – RELAÇÃO NMHC/THC USANDO OS CICLOS DE ENSAIO EURO E WMTC

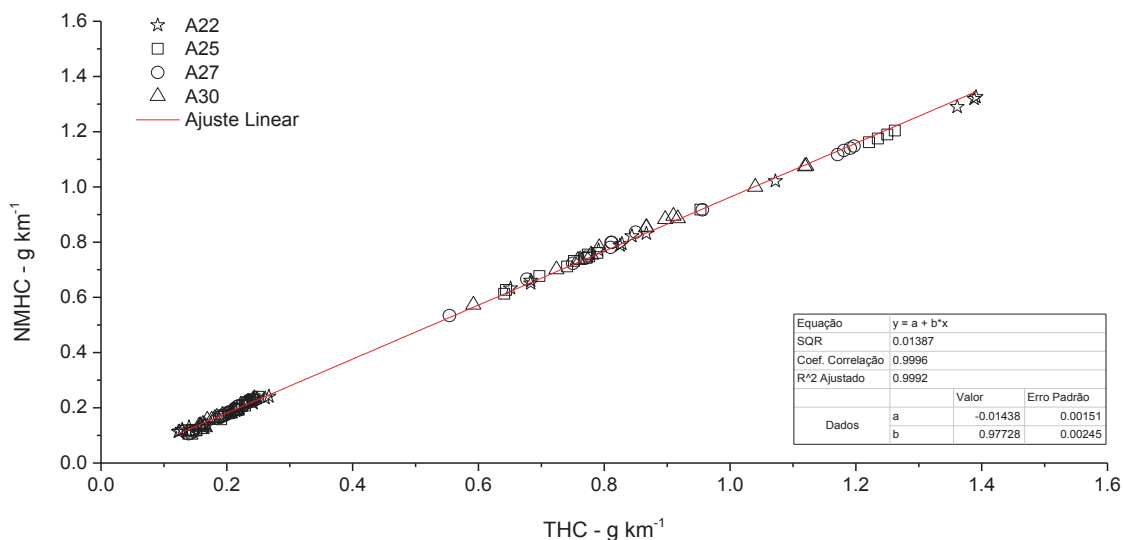


FONTE: O autor (2017).

Realizaram-se, ainda, ensaios em motocicletas movidas a gasolina das fases PP, M1, M2 e M3 com variação do teor de etanol na gasolina próximo aos limites estabelecidos pela legislação, para verificar influências na relação NMHC/THC. A FIGURA 45 apresenta uma manutenção na correlação entre os compostos com diferentes teores de etanol. Nessa análise, utilizaram-se ensaios em sete motocicletas do programa, totalizando 129 testes.



FIGURA 45 – RELAÇÃO ENTRE NMHC E THC COM DIFERENTES TEORES DE ETANOL EM MOTOCICLOS A GASOLINA



FONTE: O autor (2017).

Para construção de uma relação geral, consideraram-se 195 ensaios de emissões adotando-se os ciclos Euro e WMTC em 51 motocicletas diferentes, englobando as fases Pré-Promot, M1, M2, M3 e M4, utilizando gasolina A22. A FIGURA 46 apresenta a relação existente entre as emissões de THC e NMHC nos motocicletas ensaiados. Observa-se uma linearidade entre a emissão dos compostos, com coeficiente de correlação de 0,999, permitindo estimar a emissão de NMHC a partir dos resultados de THC obtidos nos ensaios de homologação e conformidade de produção por meio da equação (22), obtida por regressão linear dos dados.

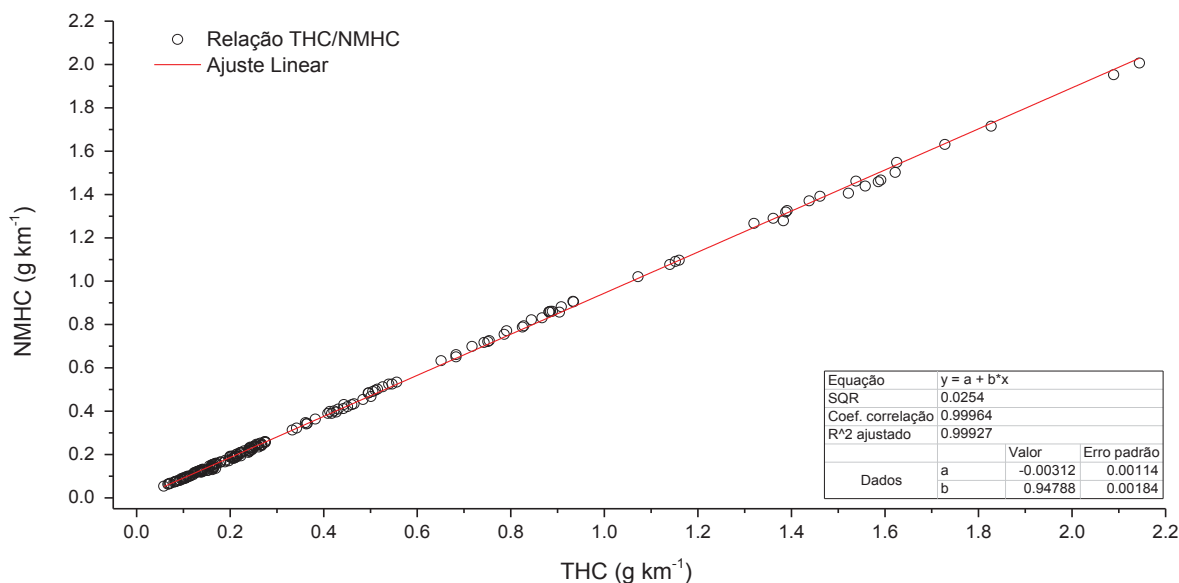
$$NMHC_{CALC} = (THC \times 0,94788) - 0,00312 \quad (22)$$

em que:

$NMHC_{CALC}$  – estimativa das emissões dos hidrocarbonetos do tipo não metano a partir das emissões conhecidas do total de hidrocarbonetos (THC).

THC – emissão do total de hidrocarbonetos em ensaios padronizados.

FIGURA 46 – RELAÇÃO NMHC/THC EM DIFERENTES MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).

Para estimar o fator de emissão de NMHC desta pesquisa, utilizou-se a relação apresentada na equação (22) aplicada aos fatores de emissão sugeridos para o THC. A equação (23) apresenta a expressão geral para obtenção dos fatores de NMHC usando a combinação entre a equação para estimar os fatores de emissão de THC, aplicada a cada fase/ano de fabricação, e a equação para determinação dos valores de NMHC – equação (22) – a partir das emissões de THC.

$$F_{NMHC} = (A1 \times b - a) + \frac{(A2 \times b - a) - (A1 \times b - a)}{1 + 10^{(Logx0 - x)p}} \quad (23)$$

em que:

$F_{NMHC}$  – estimativa do fator de emissão para o NMHC a partir das regressões aplicadas ao THC;

$a = 0,00312$ ;

$b = 0,94788$ ;

$A1$  e  $A2$  - limites inferior e superior, respectivamente, das emissões de THC das equações de cada fase/ano de fabricação;

$Logx0$  e  $p$  – constantes das equações de regressão de cada fase/ano de fabricação.

Usando o mesmo método, determinou-se a relação entre as emissões de THC/NMHC com uso de etanol hidratado. Os resultados obtidos demonstraram uma

alta correlação entre os compostos ( $R^2$  ajustado igual a 0,94), sendo utilizada a equação de regressão linear determinada para estimar as emissões de NMHC nesta pesquisa. Os coeficientes utilizados na equação para determinação das emissões de NMHC com uso de etanol foram:  $a = -0,01111$  e  $b = 0,91285$ . Os dados de ajuste são apresentados no APÊNDICE 9, em que são, ainda, disponibilizadas correlações com outros teores de etanol na gasolina e comparativo da aplicação da correlação proposta.

Nas correlações apresentadas o valor de NMHC não contempla o desconto da parcela de álcool não queimado (ANQ) que é detectado pelo analisador de hidrocarbonetos. A legislação nacional e internacional não prevê uma metodologia para essa dedução em motocicletas. E, mesmo tendo um menor impacto ambiental, esta pesquisa optou por manter a fração de ANQ nos resultados apresentados de NMHC. No APÊNDICE 9 apresenta-se uma correlação da emissão de THC e NMHC-ANQ, possibilitando estimar os valores de hidrocarbonetos do tipo não metano sem considerar as emissões de álcool não queimado a partir das emissões do total de hidrocarbonetos.

#### 4.1.1.6 Determinação do Fator de emissão para o $CH_4$

As emissões de metano, como as de NMHC, não fazem parte da regulamentação em motocicletas, não estando, assim, disponíveis informações das emissões desse composto nos dados de homologações e controle de produção fornecidos pelo IBAMA. Para estimativa de seus fatores de emissão, utilizaram-se as combinações das relações desenvolvidas para estimar as emissões de NMHC com os fatores apresentados para o THC, onde a emissão de metano provém da subtração do NMHC das emissões de THC, conforme equação (24):

$$F_{CH_4} = F_{THC} - F_{NMHC} \quad (24)$$

em que:

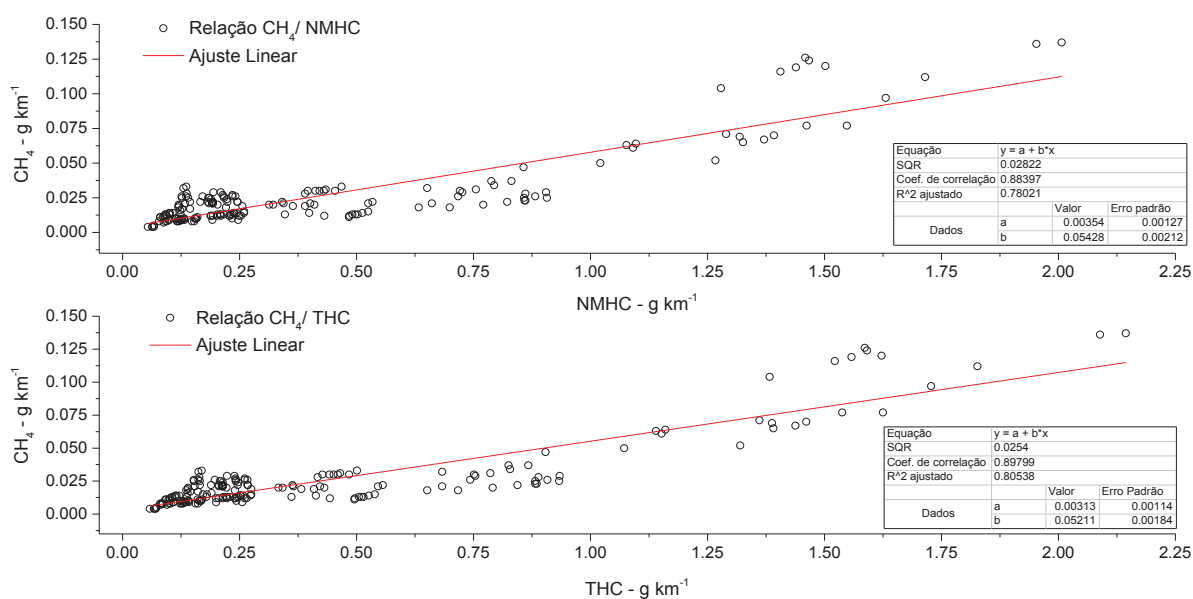
$F_{CH_4}$  – estimativa do fator de emissão para o metano;

$F_{THC}$  – estimativa do fator de emissão para o total de hidrocarbonetos;

$F_{NMHC}$  – estimativa do fator de emissão para os gases do tipo não metano.

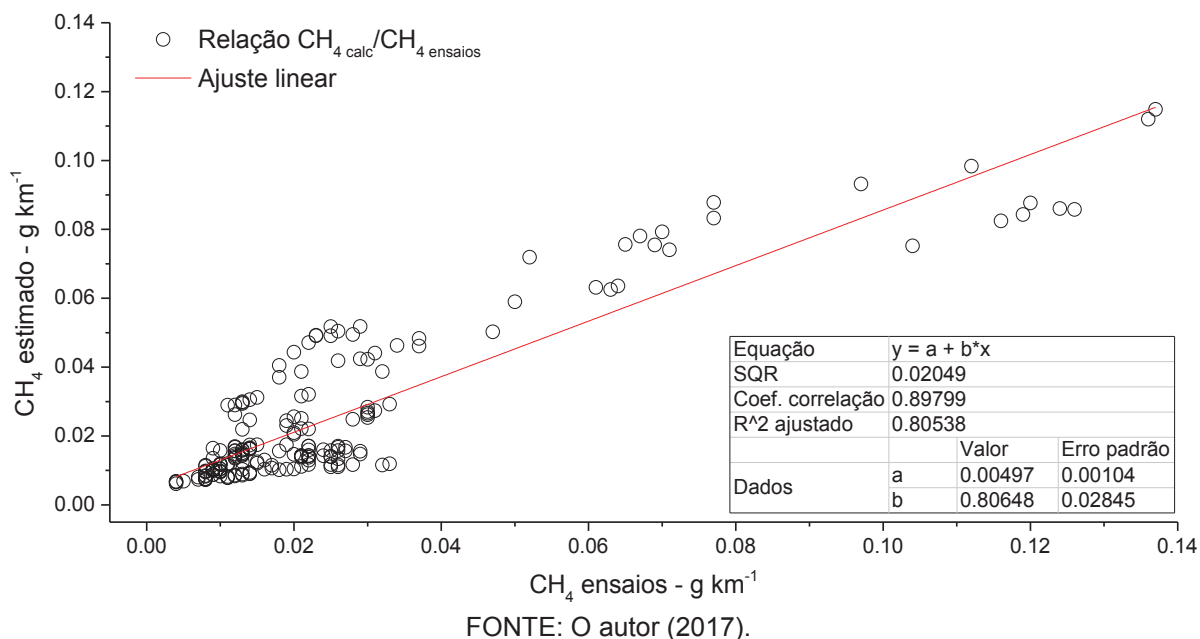
Observa-se que a emissão desse gás não apresenta a mesma correlação que as emissões entre THC e NMHC. A FIGURA 47 ilustra a relação entre a emissão de metano e hidrocarbonetos totais e do tipo não metano nos experimentos com gasolina A22-S50. Observa-se, conforme coeficiente de correlação, que aproximadamente 89% das emissões de  $\text{CH}_4$  podem ser explicadas pelas emissões de THC e NMHC.

FIGURA 47 – RELAÇÃO ENTRE  $\text{CH}_4$  E EMISSÕES DE NMHC E THC COM USO DE GASOLINA



FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 48 apresenta-se a relação entre o  $\text{CH}_4$  medido nos ensaios de emissões e o valor estimado desse gás, usando a relação apresentada na equação (24). Devido à interdependência entre as variáveis, observa-se que o coeficiente de correlação (0,89) obedece à mesma relação entre as emissões medidas de THC e  $\text{CH}_4$ .

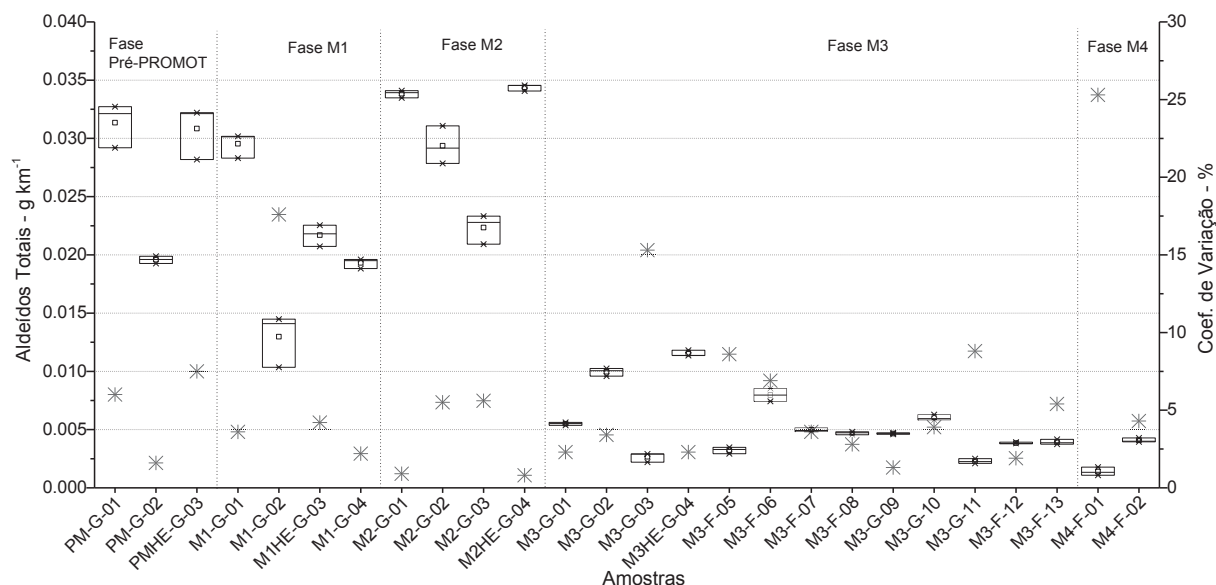
FIGURA 48 – RELAÇÃO ENTRE CH<sub>4</sub> MEDIDO E ESTIMADO

#### 4.1.1.7 Determinação do Fator de emissão para Aldeídos

As emissões de aldeídos em motocicletas não possuem regulamentação internacional. O Brasil adotou os parâmetros da legislação europeia como base de sua legislação para essa classe de veículo automotor seguindo as mesmas diretrizes. Porém, devido às características da matriz de combustíveis brasileira, essas emissões possuem relevância no cenário nacional (DAEMME et al., 2016c), sendo regulamentadas para os veículos leves de passageiros desde 1992.

Na FIGURA 49 apresentam-se as emissões de aldeídos totais obtidas nos experimentos com as amostras estudadas, utilizando-se de gasolina A22-S50. Observa-se que os ensaios foram realizados em triplicata em cada motociclo. Nos resultados fica evidente uma mudança de patamar de emissão com entrada em vigor da fase M3, a partir de 2009, onde a presença do catalisador se mostrou fundamental para atender os níveis de emissões dos compostos regulamentados. Ainda, observa-se um baixo coeficiente de variação nos resultados, com exceção do motociclo M4-F-01, que foi superior a 20%.

FIGURA 49 – EMISSÃO DE ALDEÍDOS TOTAIS EM MOTOCICLOS E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO



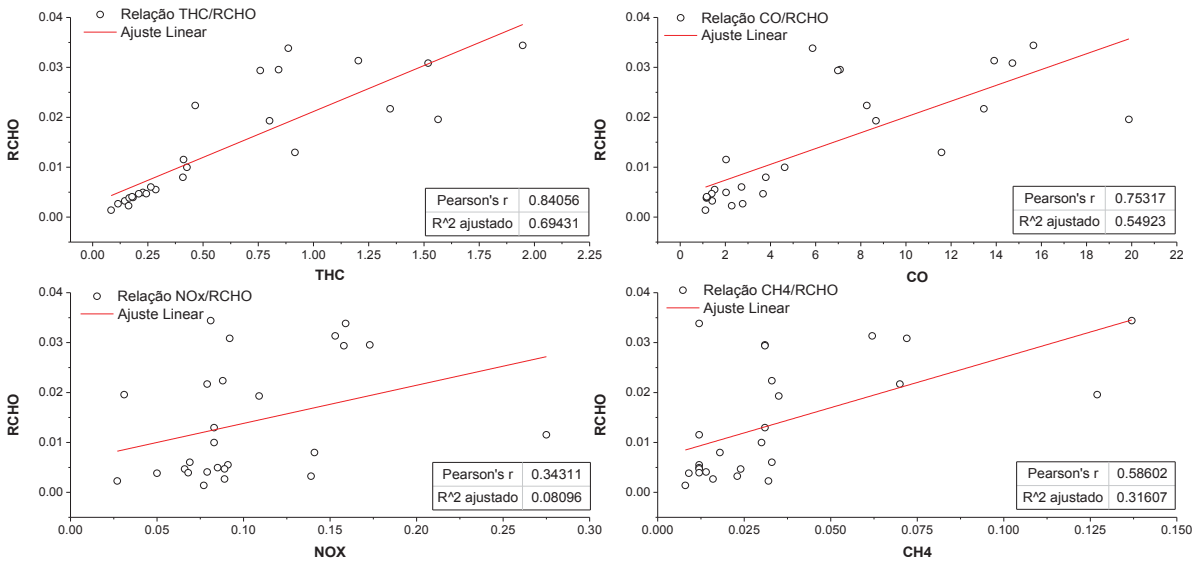
FONTE: O autor (2017).

Os aldeídos são hidrocarbonetos formados durante o processo incompleto de combustão, sendo os principais: o formaldeído (HCHO) e o acetaldeído (CH<sub>3</sub>CHO), emitidos em maior concentração (HO; KIM, 2011; MORKNOY; KHUMMONGKOL; PRUEAKSASIT, 2011). Os resultados desses compostos são apresentados como aldeídos totais (RCHO), que compreendem a soma do formaldeído e acetaldeído.

Devido à carência de informações e perfil das emissões desses compostos durante a vida útil dos motocicletas, buscou-se correlacionar os dados experimentais obtidos nesta pesquisa com as emissões regulamentadas (THC, CO e NO<sub>x</sub>) que possuem uma maior base de dados, incluindo-se o CH<sub>4</sub>. Na FIGURA 50 pode-se observar a relação entre os compostos, sendo que a melhor correlação dos aldeídos totais se dá com THC, com coeficiente de determinação ajustado de 0,69, e a menor com o NO<sub>x</sub> (R<sup>2</sup> ajustado: 0,08).

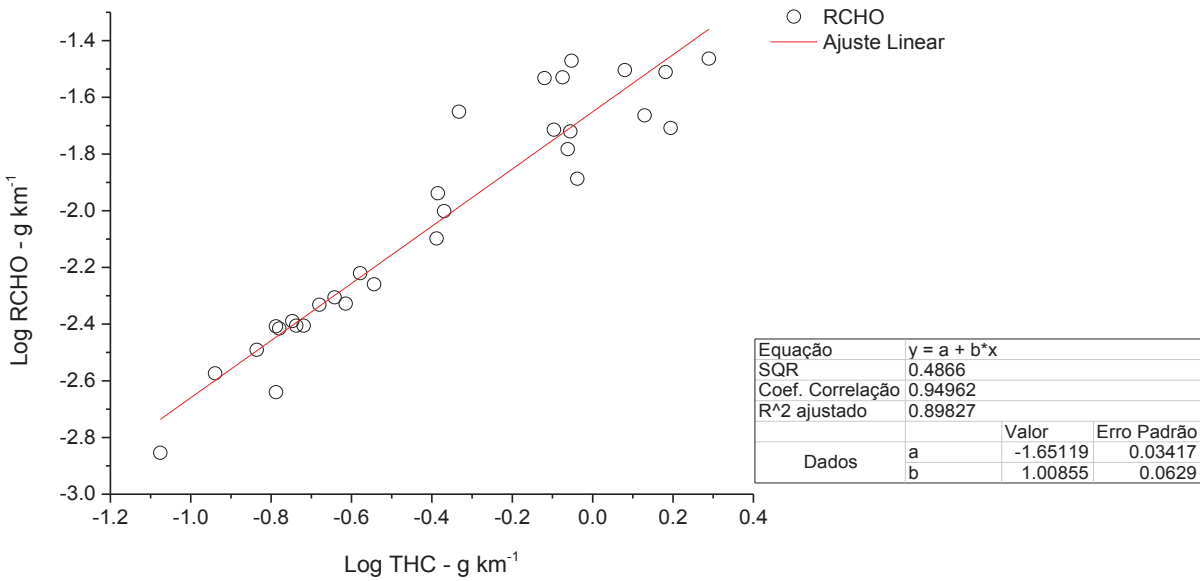
Utilizando-se dos dados das emissões de THC e RCHO em base logarítmica obtém-se uma otimização na correlação, passando o R<sup>2</sup> ajustado para 0,90. Na FIGURA 51 apresentam-se as informações da regressão entre os compostos citados e valores da equação ajustada.

FIGURA 50 – CORRELAÇÃO ENTRE ALDEÍDOS TOTAIS E THC, CO, NOX E CH4



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 51 – CORRELAÇÃO ENTRE ALDEÍDOS TOTAIS E THC - BASE LOG



FONTE: O autor (2017).

Na equação (25), observa-se o resultado da regressão para determinação das emissões de RCHO a partir das emissões de THC.

$$RCHO_{CALC} = 10^{(b \times \log(THC) - a)} \quad (25)$$

em que:

$RCHO_{CALC}$  – estimativa da emissão de aldeídos totais a partir dos resultados de THC;

$a$  (1,65119) e  $b$  (1,00855) – parâmetros da regressão linear;

$THC$  - hidrocarbonetos totais para qual se busca a estimativa de emissão de  $RCHO$ .

Aplicando-se a equação da regressão entre as emissões de THC e aldeídos nas equações apresentadas para estimativas dos fatores de emissão para os hidrocarbonetos totais, obtém-se a estimativa do fator de emissão para os aldeídos em motocicletas, de acordo com a fase do PROMOT e ano de produção, conforme equação:

$$F_{RCHO} = 10^{(b \times \text{Log}(A1) - a)} + \frac{10^{(b \times \text{Log}(A2) - a)} - 10^{(b \times \text{Log}(A1) - a)}}{1 + 10^{(\text{Log}x0 - x)p}} \quad (26)$$

em que:

$F_{RCHO}$  – estimativa do fator de emissão para os aldeídos totais a partir das regressões aplicadas ao THC;

$a = 1,65119$ ;

$b = 1,00855$ ;

$A1$  e  $A2$  limites inferior e superior, respectivamente, das emissões de THC das equações de cada fase/ano de fabricação;

$\text{Log}x0 - x$  e  $p$  são constantes das equações de regressão de cada fase/ano de fabricação.

Com objetivo de verificar aplicação da equação de correlação entre as emissões de THC e aldeídos totais foram comparados resultados de ensaios com medição de aldeídos por cromatografia, conforme NBR 12026, com o método proposto. Os resultados utilizados para comparativo de Daemme (2012) referem-se a cinco motocicletas das fases M1, M2 e M3 utilizando gasolina A22. A TABELA 19 apresenta os valores dos ensaios medidos e calculados de aldeídos. Observa-se que os resultados estimados estão no mesmo patamar que os medidos pela técnica de cromatografia em fase líquida. A variação entre os resultados médios obtidos em cada método foi de 9,2%, demonstrando consistência na correlação proposta.



TABELA 19 – COMPARATIVO DE VALORES MEDIDOS E ESTIMADOS DE ALDEÍDOS TOTAIS

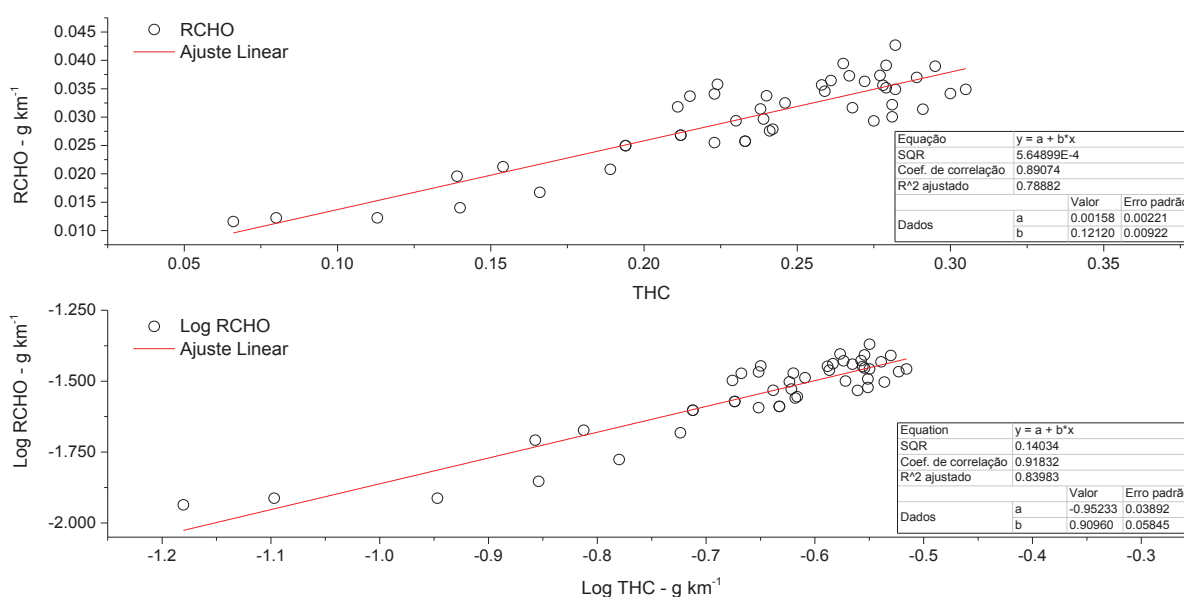
Fase Promot/ Ano/ ciclo/ motor	THC <sup>1</sup> g km <sup>-1</sup>	Aldeídos <sup>1</sup> NBR 12026 g km <sup>-1</sup>	Aldeídos estimado g km <sup>-1</sup>	Diferença %
M1/ 2003/ Euro/ 125 cm <sup>3</sup>	0,880	0,01905	0,01963	2,9%
M2/ 2008/ Euro/ 100 cm <sup>3</sup>	0,867	0,01649	0,01933	14,7%
M3/ 2009/ Euro/ 125 cm <sup>3</sup>	0,254	0,00413	0,00560	26,3%
M3/ 2010/ Euro/ 300 cm <sup>3</sup>	0,163	0,00391	0,00358	-9,1%
M3/ 2011/ Euro/ 150 cm <sup>3</sup>	0,191	0,00393	0,00420	6,5%
Média geral		0,00950	0,01047	9,2%

FONTE: O autor (2017).

NOTA: <sup>1</sup> – Resultados provenientes de uma média de três ensaios.

Para determinação da correlação entre as emissões de aldeídos e THC nos motocicletos *flex fuel* com etanol hidratado como combustível utilizou-se o mesmo método empregado para o uso da gasolina A22. Na FIGURA 52 apresentam-se as correlações entre as emissões de THC e aldeídos em 47 ensaios de dez motocicletos *flex fuel*. Observa-se um coeficiente de correlação ajustado de 0,79 para os dados em escala normal e de 0,84 para as emissões de aldeídos totais em escala logarítmica na base dez.

FIGURA 52 – CORRELAÇÃO ENTRE ALDEÍDOS TOTAIS E THC COM USO DE EHR



FONTE: O autor (2017).

Para estimar as emissões de aldeídos em motocicletos *flex fuel* com etanol hidratado como combustível adotou-se a equação (27), derivada da correlação que utiliza o logaritmo das emissões de THC e RCHO na base dez:

$$RCHO_{EHR/CALC} = 10^{((b \times \text{Log}(THC)) - a)} \quad (27)$$

em que:

$RCHO_{EHR/CALC}$  é a estimativa da emissão de aldeídos totais com uso de EHR a partir dos resultados de THC;

$a$  (0.95233) e  $b$  (0.90960) – parâmetros da regressão linear;

$THC$  – hidrocarbonetos totais para qual se busca a estimativa de emissão de RCHO.

#### 4.1.1.8 Determinação do Fator de emissão para o $NH_3$

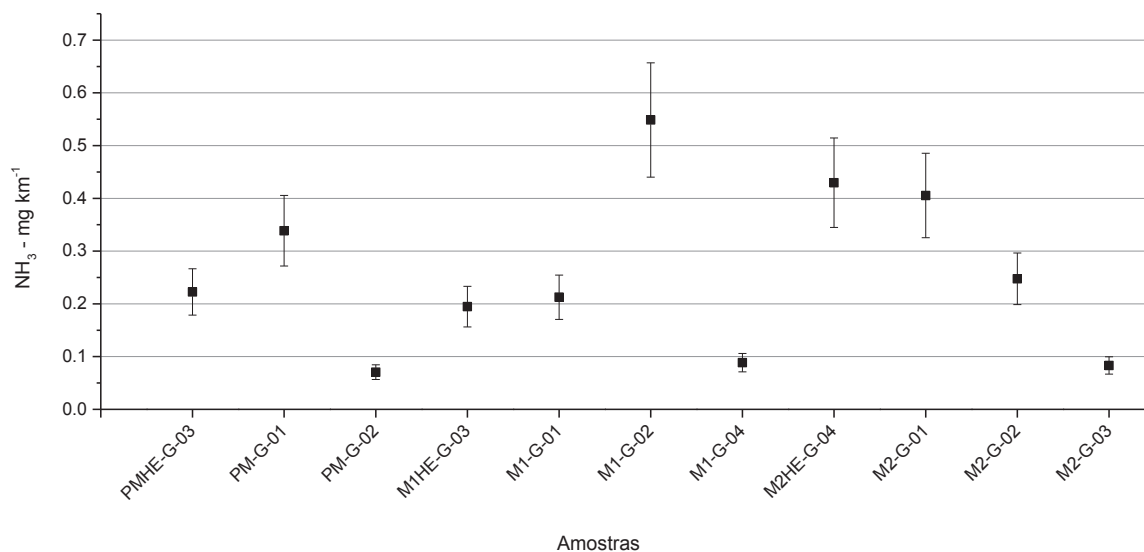
O planejamento experimental para os ensaios com uso da técnica de FTIR para determinação das emissões não regulamentadas previu a realização de um ensaio em cada amostra do programa. Para possibilitar estimar a incerteza do tipo A com uso da técnica FTIR utilizaram-se ensaios de algumas das amostras executados em triplicata (PENTEADO; DAEMME; MELO, 2012; DAEMME et al., 2013; PENTEADO et al., 2013; DAEMME et al., 2014d, 2016d). A incerteza combinada do tipo A nos ensaios descritos foi de 19,75%, sendo esse valor adotado para os fatores de emissão desse composto. Os resultados apresentados obtiveram-se com uso de gasolina A22-S50.

##### A) Motociclos das fases PP, M1 e M2

Os motocicletos englobados nessas fases não utilizavam catalisadores de três vias (TWC) ou sistema de injeção eletrônica de combustível. Conforme dados da literatura e experimentos, a formação de  $NH_3$  nos gases de escapamento em veículos do ciclo Otto está relacionada ao uso de catalisadores para redução do  $NO_x$  (LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009; PENTEADO; DAEMME; MELO, 2012; PENTEADO et al., 2013; DAEMME et al., 2014a, 2014d, 2016d). Dessa maneira os resultados dos motocicletos dessas fases foram agrupados por apresentarem as mesmas características e valores similares de emissão do composto.

A FIGURA 53 apresenta os valores de emissão ( $\text{mg km}^{-1}$ ) obtidos nos experimentos com os motocicletos das fases PP, M1 e M2. Nos resultados não é possível observar uma tendência de emissão de acordo com a fase do PROMOT, que engloba: tecnologias, anos de fabricação e expectativa de acúmulo de quilometragem.

FIGURA 53 – EMISSÃO DE  $\text{NH}_3$  - AMOSTRAS DAS FASES PP, M1 E M2



FONTE: O autor (2017).

Pode-se observar a ausência de uma correlação entre a emissão de  $\text{NH}_3$  e as principais características dos motocicletos (ano de fabricação, fase do PROMOT e quilometragem acumulada) na matriz de correlação apresentada na TABELA 20, em que ocorre uma baixa correlação da emissão de  $\text{NH}_3$  com as características avaliadas. Segundo Lattin, Carroll e Green (2011), uma correlação considerável é superior a 0,40.

TABELA 20 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE EMISSÃO DE  $\text{NH}_3$  E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS

	ANO	PROMOT	KM	$\text{NH}_3$
ANO	1	0.97	-0.99	0.10
PROMOT	0.97	1	-0.97	0.18
KM	-0.99	-0.97	1	-0.11
$\text{NH}_3$	0.10	0.18	-0.11	1

FONTE: O autor (2017).

O valor de emissão médio para a amônia nas amostras pesquisadas foi de  $0,26 \pm 0,05 \text{ mg km}^{-1}$ , sendo adotado como fator de emissão de amônia para os motocicletos das fases PP, M1 e M2.

Andersson, Lance e Jemma (2003) apresentam valores de emissão de amônia, utilizando-se da técnica de FTIR, para motocicletos desprovidos de injeção eletrônica e catalisador na ordem de  $1,5 \text{ mg km}^{-1}$ . Nos experimentos empregou-se o mesmo protocolo de ensaios desta pesquisa, sendo utilizado como combustível gasolina sem adição de etanol, as amostras possuindo motores com capacidade volumétrica média de  $450 \text{ cm}^3$ , acima da média nacional, em que 87% das vendas são de motores abaixo de  $160 \text{ cm}^3$  (ABRACICLO, 2016). Em experimentos realizados com amostras da fase M3 (DAEMME et al., 2014a, 2014b, 2014d, 2016d), dotadas de catalisador e injeção eletrônica de combustível que tiveram uma instrumentação no sistema de exaustão para coleta das emissões antes do catalisador, observou-se uma emissão de amônia de  $0,22 \text{ mg km}^{-1}$  a  $0,73 \text{ mg km}^{-1}$ . Sutton et al. (2000) apresentam fatores de emissão de  $1,2 \text{ mg km}^{-1}$ , tendo como base relatórios da Agência Europeia de Meio Ambiente. O IPCC (2016) apresenta um valor de  $1,9 \text{ mg km}^{-1}$  para motocicletos das fases Euro I e II, similares às fases M1 e M2 da legislação brasileira. Esses fatores de emissão não são medidos durante ensaios de emissões, os mesmos são calculados utilizando como base o potencial que um quilograma de combustível pode gerar do composto e a autonomia média dos veículos, sendo válidos para amônia e  $\text{N}_2\text{O}$ .

#### B) Motociclos das fases M3 e M4

Essas fases se caracterizam pelo uso de catalisadores que atuam sobre as emissões, reduzindo-as para atender aos níveis mais estreitos da legislação. O uso de catalisadores de três vias é responsável pelo aumento da emissão de amônia nos veículos automotores (SUAREZ-BERTOIA; ZARDINI; ASTORGA, 2014; DAEMME et al., 2016d).

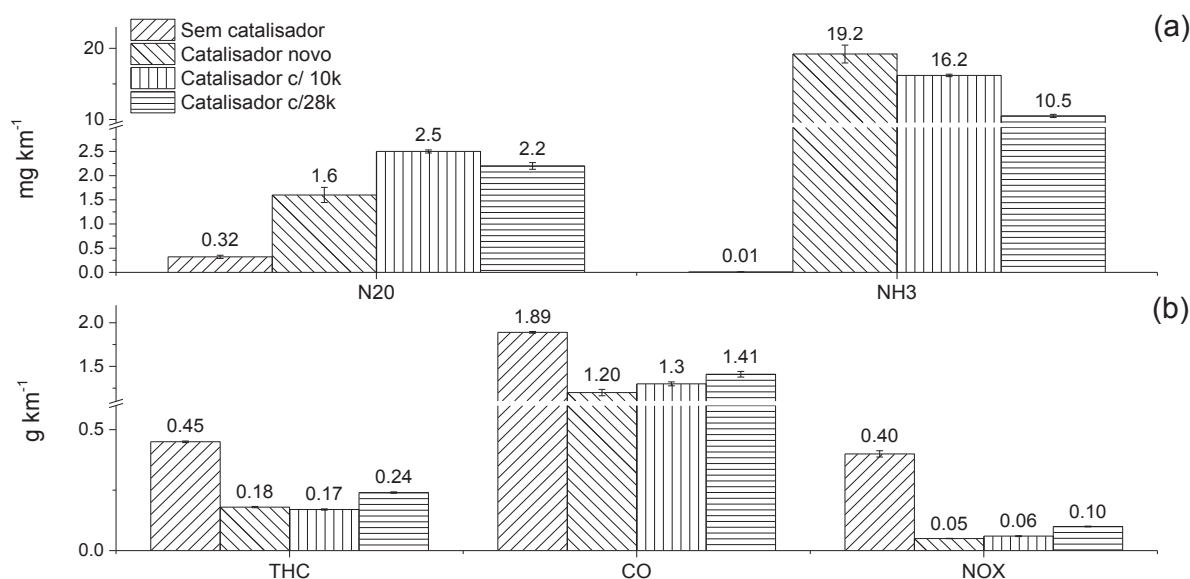
Estudos sobre a emissão de amônia em veículos dotados de catalisadores de três vias citam uma redução do composto com envelhecimento do catalisador, fato associado a uma redução na conversão dos poluentes tidos como seus precursores ( $\text{CO}$  e  $\text{NO}_x$ ) (HUAL et al., 2004; BURGARD; BISHOP; STEDMAN, 2006; HEEB et al., 2006, 2008; LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009).

Com objetivo de simular a condição de envelhecimento de um catalisador, executaram-se, em laboratório, testes com um motociclo da fase M3, motor de 125 cm<sup>3</sup>, ano de fabricação 2009, dotado de sistema de injeção eletrônica de combustível utilizando-se catalisadores em diferentes condições de uso. O combustível usado foi a gasolina A22-S50. Observa-se que os catalisadores usados foram todos com a mesma especificação, destinados ao modelo em teste. Para cada catalisador executou-se um mínimo de cinco ensaios de emissões com uso da técnica de FTIR e protocolo de ensaios pertinente à fase do motociclo. A FIGURA 54 apresenta os resultados comparativos entre as emissões sem catalisador, com catalisador novo, com catalisador com aproximadamente 10.000 km e um catalisador com aproximadamente 28.000 km acumulados.

Referente às emissões de NH<sub>3</sub> observa-se uma mudança do perfil de emissões: da condição sem catalisador ( $0,015 \pm 0.002 \text{ g km}^{-1}$ ), para uso do catalisador novo ( $19,17 \pm 0,45 \text{ g km}^{-1}$ ) e um decréscimo gradual com uso dos catalisadores envelhecidos. Para o N<sub>2</sub>O a mudança do perfil de sem catalisador para com seu uso apresentou o mesmo comportamento da amônia, ou seja, um incremento nas emissões, porém observa-se que nos catalisadores envelhecidos as emissões são superiores ao catalisador novo. Pesquisas apresentam uma maior emissão desse composto em catalisadores envelhecidos (BECKER et al., 1999; LIPMAN; DELUCCHI, 2002). A maior emissão em catalisadores com desativação de seus sítios está ligada principalmente à perda de eficiência da redução do composto pelo próprio catalisador (ODAKA; KOIKE; SUZUKI, 2000).

Quanto às emissões regulamentadas de THC, CO e NO<sub>x</sub>, houve uma redução significativa com uso dos catalisadores, sendo observada uma maior eficiência de conversão para o NO<sub>x</sub>, respectivamente de 86%, 84% e 74% para o catalisador novo, com 10k e 28k. O mesmo comportamento foi observado para o CO. Conforme a literatura citada, a redução na eficiência de conversão dos precursores da amônia (CO, NO<sub>x</sub>) nos catalisadores está correlacionada com a redução em suas emissões.

FIGURA 54 – EMISSÕES COM USO DE CATALISADORES EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE ENVELHECIMENTO

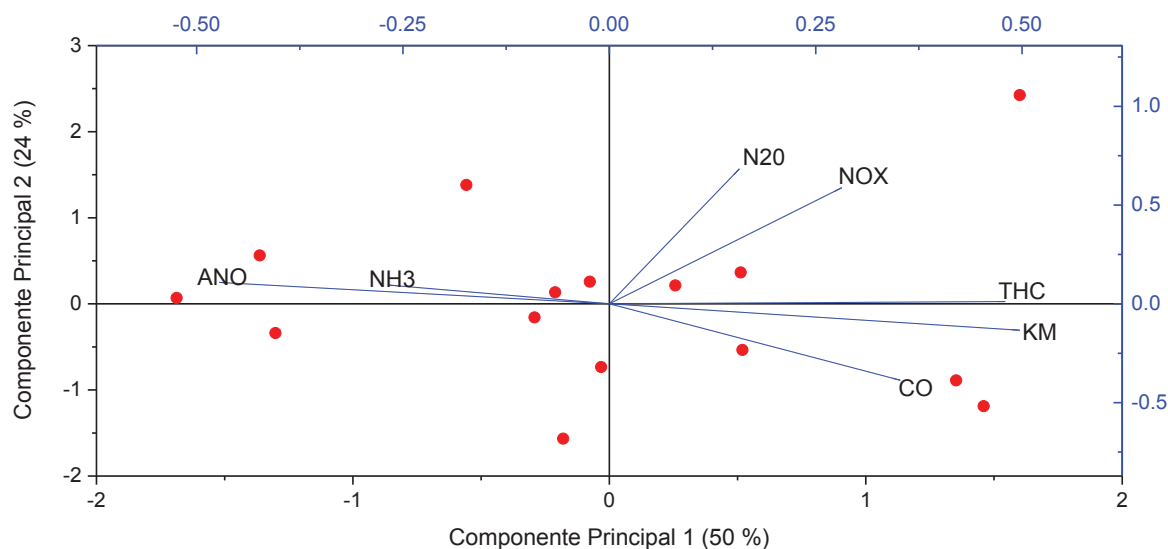


FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 55 observa-se a análise de componentes principais para os motocicletas das fases M3 e M4 entre os parâmetros de emissões regulamentadas (CO, THC e NO<sub>x</sub>), características das amostras (ano de fabricação “ANO”, acúmulo de quilometragem “KM”) e emissões de NH<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O. As componentes principais 1 e 2 representam aproximadamente 74% da variabilidade do sistema. Ainda, são as únicas componentes com autovalor acima de 1, sendo retidas para análise. Quanto à emissão de amônia é possível observar seu comportamento inversamente proporcional às emissões de CO, THC, NO<sub>x</sub> e N<sub>2</sub>O e acúmulo de rodagem (km). Isso demonstra que veículos menos rodados possuem maior eficiência catalítica, sendo que os processos de redução e oxidação dos compostos NO<sub>x</sub> e CO, respectivamente (através do processo WGS) propiciam a formação de amônia (BARBIER; DUPREZ, 1994; HEEB et al., 2006; MEJÍA-CENTENO et al., 2007; LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009; MEJÍA-CENTENO; CASTILLO; FUENTES, 2012). Ainda, verifica-se que as emissões do composto aumentam nos veículos mais novos. Já para as emissões de N<sub>2</sub>O observa-se uma tendência de aumento com uso (acúmulo de quilometragem) e uma maior correlação com as emissões de NO<sub>x</sub>. O aumento das emissões de NO<sub>x</sub> possui uma menor correlação com a intensidade de uso (componente 1), pois motocicletas com maior uso, além da degradação do catalisador, tendem a piorar o processo de combustão devido aos

desgastes dos componentes mecânicos e, em consequência, ocorrendo a redução das emissões de  $\text{NO}_x$ . Assim as emissões de  $\text{NO}_x$  possuem uma maior correlação com a componente 2, indicando mais especificamente a ação do catalisador, e a degradação do catalisador contribui para o aumento das emissões de  $\text{NO}_x$  e  $\text{N}_2\text{O}$ .

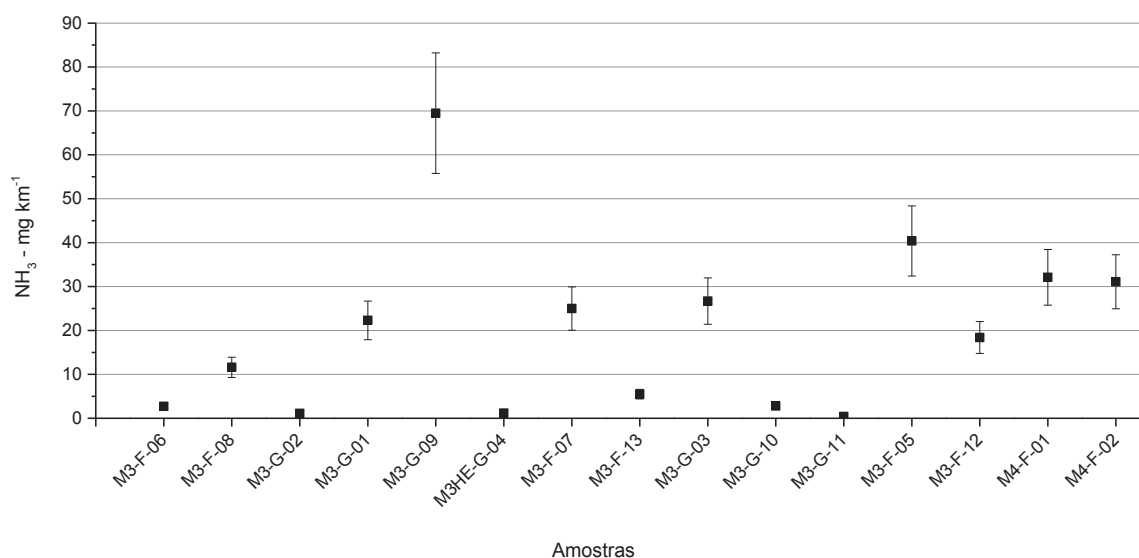
FIGURA 55 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA AS EMISSÕES REGULAMENTADAS,  $\text{NH}_3$  E  $\text{N}_2\text{O}$



FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 56 apresenta o valor das emissões de  $\text{NH}_3$  para os motocicletas pertencentes à matriz de ensaios deste estudo, com uso de gasolina A22 S50. A média ponderada para o composto, levando-se em consideração o volume de deslocamento dos motores e representatividade de vendas (ABRACICLO, 2016), foi de  $16,06 \pm 3,17 \text{ mg km}^{-1}$ . A barra de erros se refere à estimativa de incerteza adotada.

Para estimar as emissões de  $\text{NH}_3$  nesta pesquisa utilizou-se o valor médio encontrado experimentalmente, visto que a amostra compreende veículos em diversas condições de uso, representando veículos novos e com acúmulo de quilometragem.

FIGURA 56 – EMISSÃO DE  $\text{NH}_3$  EM MOTOCICLOS DAS FASES M3 E M4

FONTE: O autor (2017).

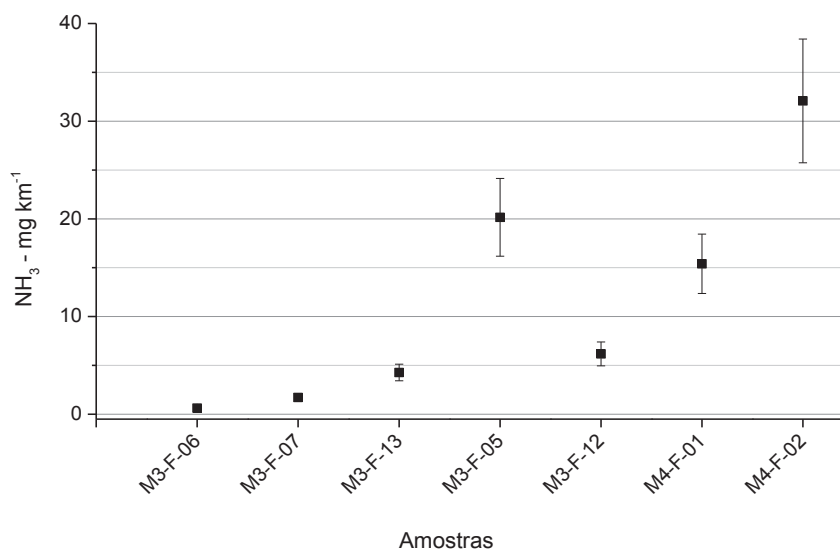
Andersson, Lance e Jemma (2003) apresentam valores de emissão de amônia em motocicletas abastecidos com gasolina, sem adição de etanol, com valores entre 16,9 e 35,8  $\text{mg km}^{-1}$ . Os motocicletas ensaiados possuíam motores com deslocamento volumétrico entre 650 e 1300  $\text{cm}^3$  e uso de catalisadores. Para motocicletas da fase Euro III, equivalentes à fase M3 no Brasil, o IPCC (2016) apresenta valores de emissão de amônia de 1,9  $\text{mg km}^{-1}$ , observando-se que esses fatores são calculados. Roe et al. (2004) apresentam um fator de emissão de 7,0  $\text{mg km}^{-1}$ , usando como referência dados do programa americano MOBILE 6.2. Em âmbito nacional, utilizando gasolina com adição de etanol, alguns trabalhos apresentam dados de emissões de amônia em motocicletas (PENTEADO; DAEMME; MELO, 2012; DAEMME et al., 2013; PENTEADO et al., 2013; DAEMME et al., 2014a, 2016d). Nessas pesquisas, usando motocicletas equipados com catalisadores e motores de deslocamento volumétrico entre 125 e 300  $\text{cm}^3$ , verificaram-se emissões de 3,6  $\text{mg km}^{-1}$  a 87,44  $\text{mg km}^{-1}$ , sendo a maior emissão referente ao motociclo com motor de 300  $\text{cm}^3$ .

As emissões de  $\text{NH}_3$  foram mensuradas nas amostras *flex fuel* com uso de etanol hidratado combustível. Os valores das emissões obtidos nos experimentos são apresentados na FIGURA 57. O valor médio ponderado das emissões foi de  $8,30 \pm 1,64 \text{ g km}^{-1}$ , emissão adotada como fator para os motocicletas *flex fuel* com uso de etanol neste estudo. Observa-se que os dois motocicletas com maiores emissões



correspondem a amostras com motores de deslocamento volumétrico maior que 160 cm<sup>3</sup>.

FIGURA 57 – EMISSÃO DE NH<sub>3</sub> EM MOTOCICLOS M3 E M4 *FLEX FUEL* COM USO DE ETANOL HIDRATADO DE REFERÊNCIA



FONTE: O autor (2017).

Pesquisas envolvendo emissões de amônia em motocicletas com uso de etanol são escassas. Penteado et al. (2013) e Daemme et al. (2014d) realizaram experimentos em motociclo *flex fuel* reportando uma emissão média de 4,0 mg km<sup>-1</sup> com uso de etanol hidratado combustível.

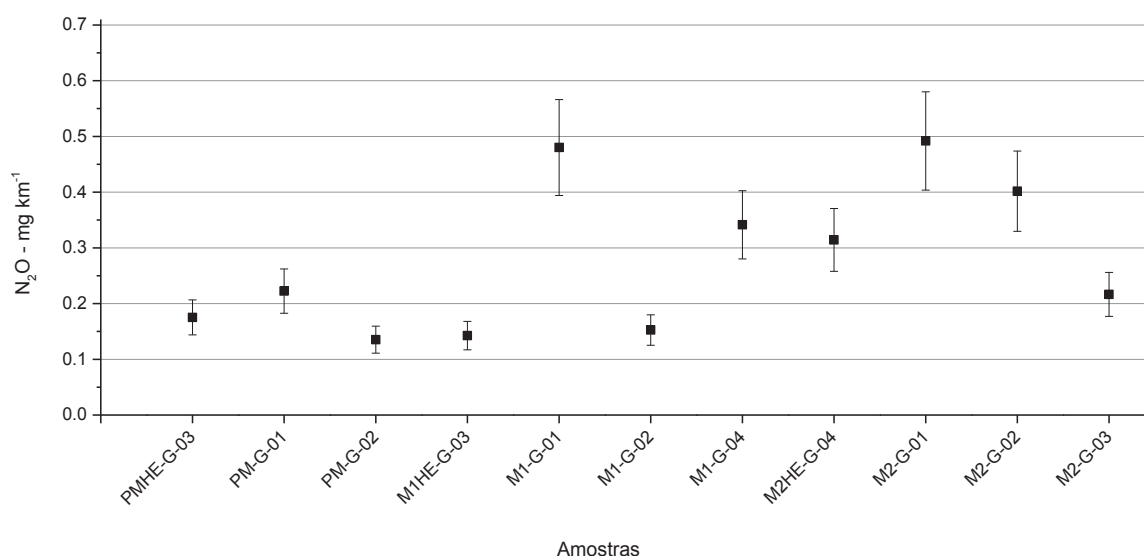
#### 4.1.1.9 Determinação do Fator de emissão para o N<sub>2</sub>O

##### A) Motociclos das fases PP, M1 e M2

As premissas utilizadas para estimar o fator de emissão de N<sub>2</sub>O dos motociclos dessas fases seguiram o modelo adotado para o fator de emissão de NH<sub>3</sub>, fato justificado por ambos os compostos terem sua emissão intensificada nos catalisadores de três vias, sistema de pós-tratamento ausente nos veículos dessas fases. Para estimativa de incerteza do tipo A utilizaram-se dados de ensaios publicados com uso de motociclo *flex fuel* (DAEMME et al., 2014d), com medições de N<sub>2</sub>O antes e após o catalisador usando combustíveis com quatro diferentes teores de etanol. O valor da incerteza combinada do tipo A obtida, para as emissões pré-catalisador, foi de 17,92 %.

A FIGURA 58 apresenta os valores de emissão para os motocicletos das fases PP, M1 e M2, sendo o valor médio obtido de  $0,25 \pm 0,05 \text{ mg km}^{-1}$ , esse adotado como fator de emissão para os motocicletos dessas fases. Os resultados apresentados referem-se ao combustível A22-S50.

FIGURA 58 – EMISSÃO DE  $\text{N}_2\text{O}$  - MOTOCICLOS DAS FASES PP, M1 E M2

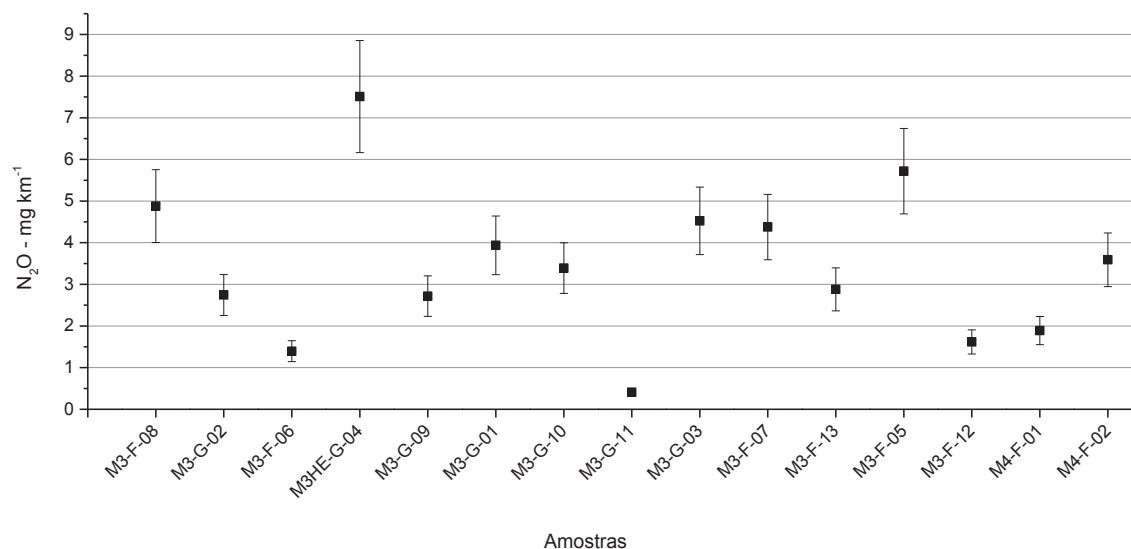


FONTE: O autor (2017).

O IEV (MMA, 2014) apresenta estimativas da emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  para os motocicletos nacionais utilizando dados da CETESB (2013a), os quais têm origem no IPCC, sendo o fator de emissão de  $2,0 \text{ mg km}^{-1}$ . Esse fator é empregado no inventário para motocicletas de todas as fases, independentemente de possuir ou não catalisador.

#### B) Motocicletas das fases M3 e M4

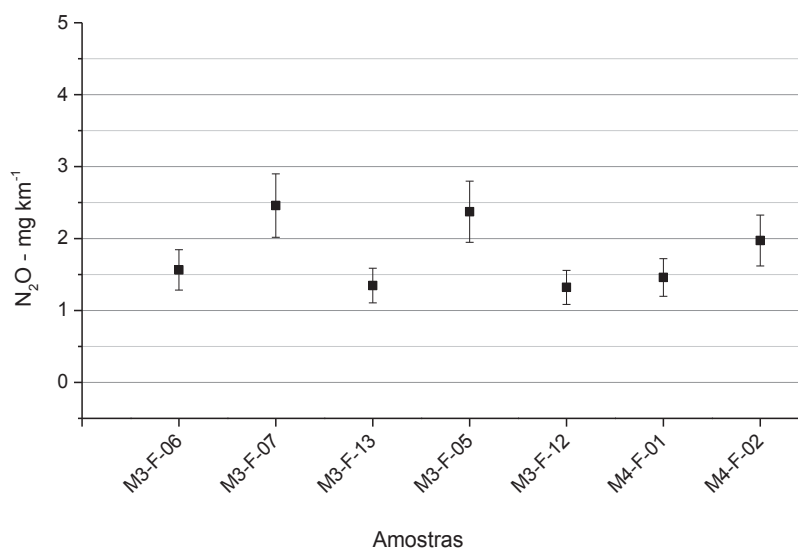
Na FIGURA 59 são apresentados os valores de emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  para as amostras das fases M3 e M4. Nos experimentos a emissão média do composto foi de  $3,31 \pm 0,59 \text{ mg km}^{-1}$ , englobando motocicletas fabricadas entre 2009 e 2016, sendo esse adotado como fator de emissão para as fases M3 e M4. O fator de emissão fixo para o  $\text{N}_2\text{O}$  foi utilizado com base nas informações da literatura, que apresentam dados de aumento da emissão com envelhecimento dos catalisadores e composição da amostra e que contemplam motos de vários anos de uso, permitindo um fator médio abrangendo as emissões de diferentes estágios de uso.

FIGURA 59 – EMISSÃO DE N<sub>2</sub>O EM MOTOCICLOS DAS FASES M3 E M4

FONTE: O autor (2017).

O mesmo procedimento foi adotado para os motocicletos *flex fuel* com uso de EHR, sendo as emissões apresentadas na FIGURA 60. A emissão média encontrada foi de  $1,70 \pm 0,30 \text{ g km}^{-1}$ , valor adotado como fator de emissão para o uso do etanol combustível.

As estimativas de emissões de N<sub>2</sub>O do IEV não consideram a emissão desse composto com uso de etanol combustível nessa categoria de veículo automotor.

FIGURA 60 – EMISSÃO DE N<sub>2</sub>O EM MOTOCICLOS M3 E M4 *FLEX FUEL* COM USO DE ETANOL

FONTE: O autor (2017).

## 4.2 RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DO CICLO OTTO

A estimativa dos fatores de emissão para os veículos leves do ciclo Otto seguiu as mesmas premissas apresentadas para os motocicletas, ou seja, adoção de fator calculado permitindo realizar projeções das emissões de acordo com os anos de uso dos veículos. Os valores de referência continuam sendo os apresentados pelo IEV e CETESB (MMA, 2014; CETESB, 2016). Algumas particularidades existem para essa classe de veículos que possuem uma base de dados mais ampla, quando comparadas aos motocicletas. Assim para cada fase apresentam-se os detalhes adotados e os resultados obtidos.

### 4.2.1 Apresentação de Resultados

Os resultados para os veículos leves são apresentados de acordo com as fases do PROCONVE e compostos analisados. Abordam-se pelo estudo as emissões de CO, THC, NO<sub>x</sub>, NMHC, CH<sub>4</sub>, aldeídos, N<sub>2</sub>O e amônia.

#### 4.2.1.1 Determinação dos fatores de emissões

- A) Veículos leves fabricados antes da implantação do PROCONVE (PP) e veículos da primeira fase (L1)

Os veículos dessas fases se caracterizam pelo uso de carburador para promover a mistura ar/combustível e ausência de catalisadores, sendo adotado pelo IEV, como fator de emissão, uma degradação linear de 20% em relação aos veículos novos ao atingir 160.000 km rodados. Após esse acúmulo as emissões foram consideradas constantes. Esse parâmetro foi aplicado pelo IEV às emissões de CO, NMHC e aldeídos. No modelo adotado pelo inventário, as emissões de NO<sub>x</sub> foram consideradas sem degradação (MMA, 2014). Os veículos fabricados antes de 1988 pertencem à fase PP e os fabricados entre 1988 e 1991 à fase L1.

Para os veículos dessas fases foi adotado por esta pesquisa o mesmo parâmetro do IEV para formulação dos fatores de emissão, acrescentando-se a este uma parcela referente aos veículos alto emissores. Para os veículos leves, dados do sistema de inspeção veicular da cidade de São Paulo apontavam para um percentual de reprovação inicial de aproximadamente 20% da frota com mais de dez anos de uso (BRANCO, F. C. et al., 2014; BRANCO, 2015). Essa informação foi empregada para simular a entrada de veículos alto emissores na frota de veículos fixando a proporção citada após o décimo ano de uso. Assim, os dados de cálculo dos fatores de emissão do IEV foram seguidos até o décimo ano de uso. Para o décimo primeiro ano, o valor de emissões foi combinado na proporção citada com o valor calculado para os veículos alto emissores, gerando o teto de emissões para o ano de fabricação em estudo. Do valor gerado pela combinação foi subtraído o valor inicial das emissões (valor de homologação) e este dividido pela estimativa de acúmulo de quilometragem correspondente ao décimo primeiro ano de uso, gerando o fator calculado. Seguindo o mesmo método empregado nos motocicletos, o fator calculado é multiplicado pelas estimativas acumuladas anuais de intensidade de uso e somado ao fator inicial para fornecer o valor de emissão para cada ano. Os dados das emissões geradas para cada ano de uso foram ajustados por meio de regressão para obtenção de uma equação que corresponda às emissões durante os anos de utilização do veículo.

Para determinação do valor do veículo alto emissor utilizou-se um fator de conversão, com base nos dados experimentais dos veículos das fases PP e L1 ensaiados em laboratório. A razão entre as emissões do veículo alto emissor das fases em estudo pelas emissões do veículo com emissões que atendiam os limites de inspeção veicular gerou o fator de conversão. Na TABELA 21 observam-se os dados médios calculados para os fatores de conversão.

TABELA 21 – FATORES DE CONVERSÃO PARA ESTIMAR VEÍCULOS ALTO EMISSORES DAS FASES PP E L1

Combustível	Dados	Fator de conversão			
		THC	CO	NOx	RCHO
Gasolina	Média	1,44	1,74	0,64	1,23
	Incerteza tipo A	0,03	0,12	0,11	0,01
Etanol	Média	1,42	2,43	0,38	1,34
	Incerteza tipo A	0,18	0,62	0,03	0,02

FONTE: O autor (2017).

A equação (28) demonstra o processo para obtenção do fator calculado a ser aplicado para se chegar aos fatores de emissão estimados:

$$fc = \frac{\left( (FE_{i=11}^{IEV} \times 0,8) + (AE \times 0,2) \right) - FE_{i=0}^{IEV}}{Iu_{i=11}} \quad (28)$$

sendo:

$fc$  – fator calculado ( $\text{g km}^{-2}$ );

$FE_{i=11}^{IEV}$  – fator de emissões do IEV referente ao décimo primeiro ano de uso para o ano de fabricação em estudo ( $\text{g km}^{-1}$ );

$AE$  – valor das emissões do veículo alto emissor ( $\text{g km}^{-1}$ );

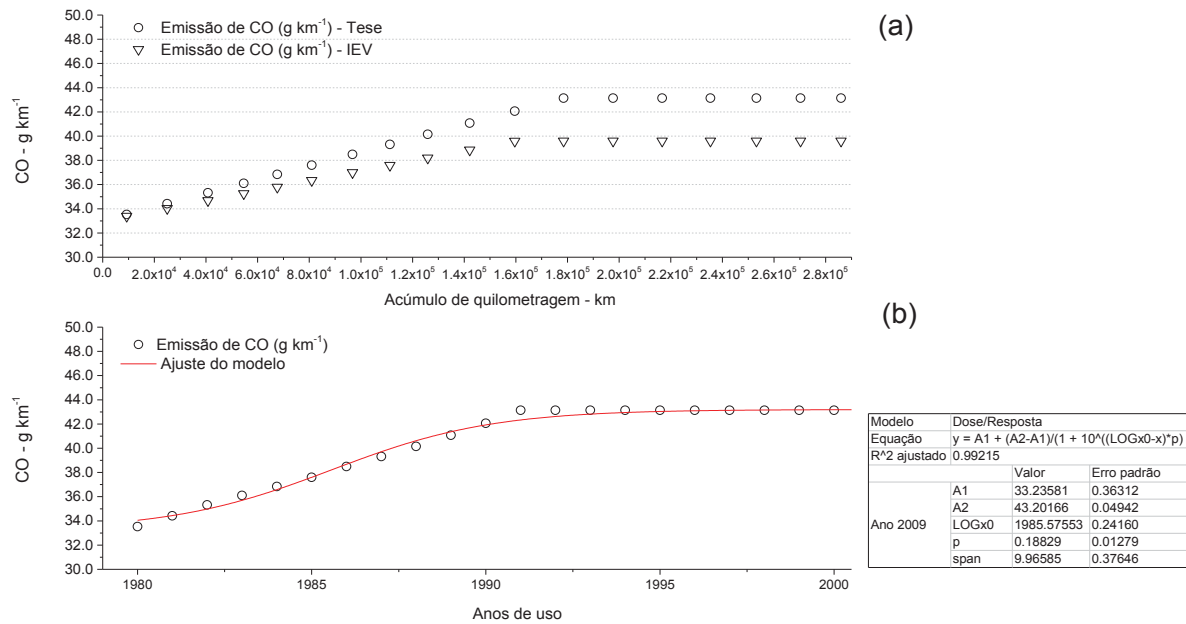
$FE_{i=0}^{IEV}$  – fator de emissões do IEV para o veículo novo ( $\text{g km}^{-1}$ );

$Iu_{i=11}$  – intensidade de uso acumulada para o décimo primeiro ano de uso (km).

As emissões do veículo alto emissor (AE) são obtidas pela multiplicação do fator de conversão pelo fator de emissão do IEV ( $FE_{i=0}^{IEV}$ ). A contribuição dos veículos alto emissores é inserida no modelo de forma proporcional aos anos de uso.

O fator de emissões para o CO utilizado pelo IEV para veículos fabricados em 1980, movidos a gasolina, é de  $33,0 \text{ g km}^{-1}$ . Aplicando-se o método descrito obtém-se um teto de emissões para esse ano de fabricação de  $43,1 \text{ g km}^{-1}$  e um fator calculado de  $5,68 \times 10^{-5} \text{ g km}^{-2}$ . Na FIGURA 61 (a) apresentam-se os fatores de emissões calculados para o modelo proposto e para o modelo do IEV, observando-se que ambos são lineares até atingirem o teto de emissões, que para o modelo do IEV é  $39,6 \text{ g km}^{-1}$ . Ainda, apresentam-se os dados de ajuste do modelo de acordo com os anos de uso (b).

FIGURA 61 – FATORES DE EMISSÃO DE CO PARA VEÍCULOS FABRICADOS EM 1980

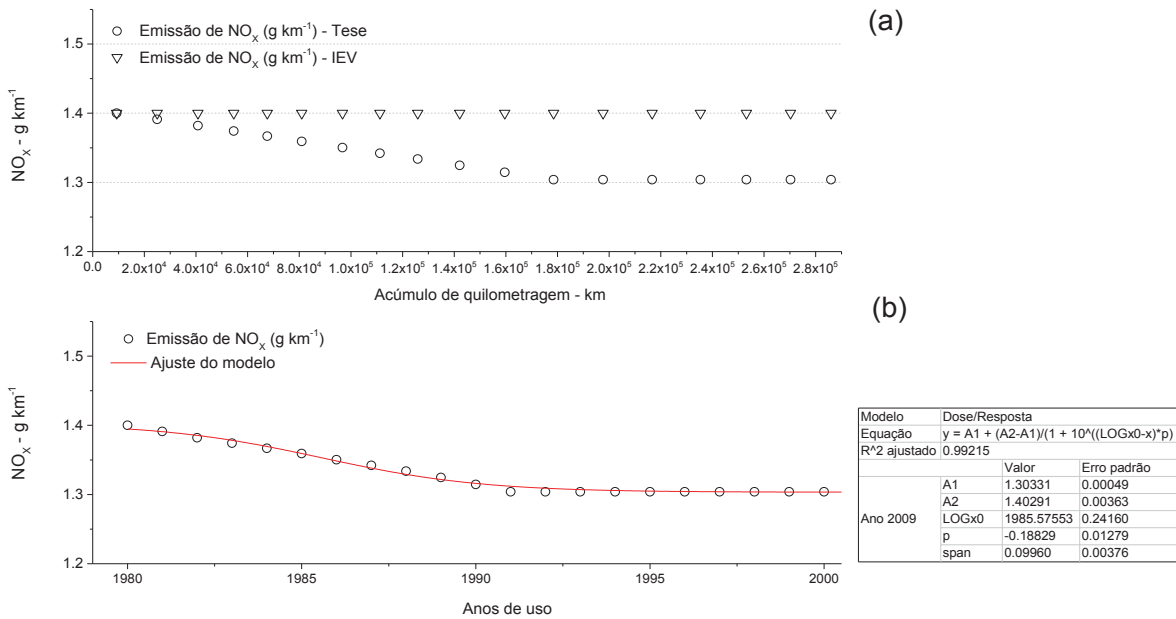


FONTE: O autor (2017).

O mesmo processo foi adotado para estimar os fatores de emissões de THC, NO<sub>x</sub> e aldeídos para os anos de fabricação pertencentes a essas fases. Os coeficientes das equações usadas para estimar os fatores de emissão propostos por esta pesquisa se encontram no APÊNDICE 8. Observa-se que o IEV adota para essas fases uma emissão constante para o NO<sub>x</sub> ao longo dos anos. Conforme dados dos experimentos, observa-se na TABELA 21 um fator de conversão para esse composto menor que um, o que indica uma redução das emissões nos veículos alto emissores com seu uso. Como observado no caso dos motocicletas, de maneira geral, o desgaste dos motores e sistemas de alimentação em veículos desse estágio tecnológico levam a uma degradação da combustão, ocasionando aumento das emissões de CO e THC com redução do NO<sub>x</sub>.

Na FIGURA 62 (a) observa-se um comparativo entre o fator do IEV para veículos produzidos no ano de 1980 (1,40 g km<sup>-1</sup>) movidos a gasolina, constante ao longo dos anos, e o fator proposto que apresenta uma redução com o uso, estabilizando em 1,30 g km<sup>-1</sup>. Apresentam-se, ainda, os dados de ajuste do modelo e equação para estimar os fatores de emissão de acordo com o ano de uso (b).

FIGURA 62 – FATORES DE EMISSÃO PARA O NO<sub>x</sub> POR ACÚMULO DE QUILOMETRAGEM (A) E AJUSTE DO MODELO PROPOSTO (B)



FONTE: O autor (2017).

B) Veículos leves das fases L2, L3 e L4

Devido aos limites de emissões mais restritivos adotados para as fases L2 e posteriores, foram incorporadas novas tecnologias aos veículos para redução das emissões, sendo as principais: uso de pós-tratamento das emissões (catalisadores) e controle da mistura ar/combustível por sistemas eletrônicos.

Para os veículos dessas fases, o IEV adota uma estimativa de degradação das emissões baseada em resultados de testes de durabilidade executados pelos fabricantes entre 2003 e 2007 (MMA, 2014). As taxas de degradação obtidas nesses testes são adicionadas aos fatores de emissão dos veículos novos de maneira linear. Os fatores de degradação utilizados são determinados para um acúmulo de quilometragem de 80.000 km. Nas estimativas do IEV, esses fatores foram assumidos como lineares e extrapolados para quilometragens acima de 80.000 km, sendo adicionados de maneira constante durante os anos de uso do veículo.

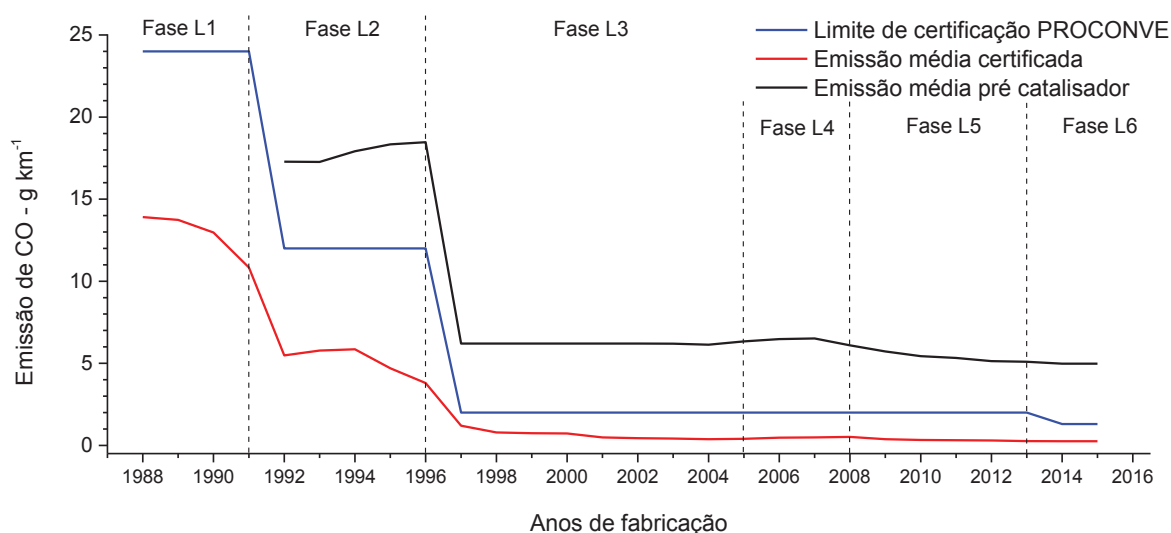
Os fatores de emissão propostos foram estimados utilizando-se dos dados experimentais de amostras pertencentes às fases em questão associados ao método proposto pelo IEV. O uso dos fatores de deterioração do IEV foi adotado até



se atingir o limite de 80.000 km rodados. Acima dessa condição, aplicaram-se os fatores provenientes das amostras ensaiadas, adicionando-se ainda um fator de majoração das emissões após o décimo ano de uso, representando uma parcela de veículos alto emissores presentes da frota. O método para determinação do fator de emissões com uso dos resultados experimentais seguiu o processo descrito para motocicletas e resumido na equação (28), aplicada, nesse caso, após um acúmulo de 80.000km.

Para estimar os valores de emissões dos veículos alto emissores das fases L2 até a fase L6 utilizaram-se os dados de ensaios realizados antes do catalisador nos veículos pertencentes a estes períodos, apresentados por Branco, Branco e Blumrich (2016). Essas emissões foram inseridas no modelo após o décimo ano de uso dos veículos, de forma proporcional à intensidade de uso dos anos em questão. A FIGURA 63 apresenta essas emissões por fases do PROCONVE para o CO. Observa-se que os dados pré-catalisador são apresentados a partir da fase L2, momento em que seu uso teve início e, ainda, que esses dados se referem a veículos novos, tornando conservador o seu uso.

FIGURA 63 – LIMITES DE EMISSÃO DE CO, EMISSÕES CERTIFICADAS E PRÉ CATALISADOR POR FASES DO PROCONVE



FONTE: Adaptado de BRANCO; BRANCO; BLUMRICH (2016).

Para demonstrar os resultados dos métodos citados que irão compor o fator de emissões a ser utilizado, efetuou-se a simulação dos fatores de emissão para o CO da fase L3, ano de fabricação 1998. Na FIGURA 64 (a) apresentam-se as estimativas para cálculo do fator de emissões pelo método do IEV, com adoção do

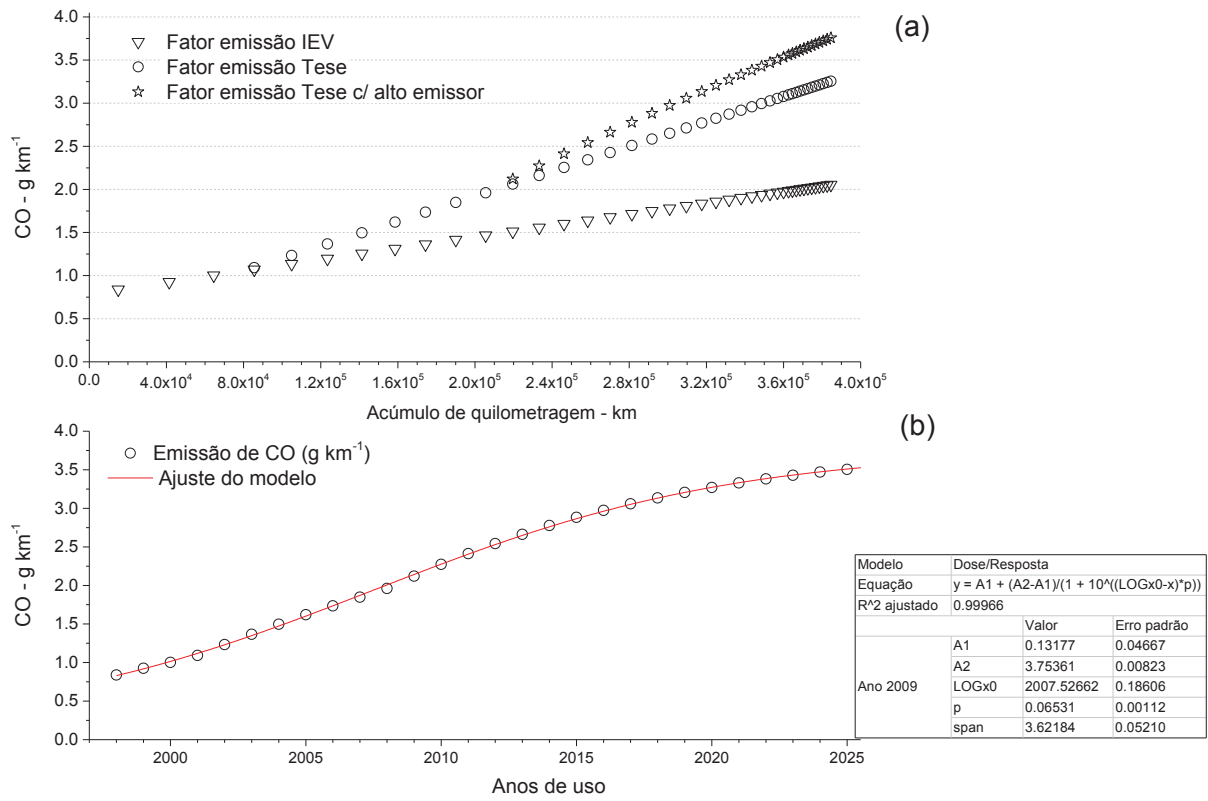
fator proposto (tese), inserido no modelo após acúmulo de 80.000 km, e com inclusão do fator de majoração das emissões após o décimo ano de uso, representando uma participação de veículos alto emissores na frota. Para esse caso, o décimo primeiro ano de uso ocorre em aproximadamente 220.000 km acumulados. Observa-se que as três estimativas são lineares em relação ao acúmulo de quilometragem. Os dados a serem utilizados para regressão são apresentados na FIGURA 64 (b), já escalonados por anos de uso. Observam-se, ainda, os dados de ajuste do modelo. As emissões para esse ano de fabricação se estabilizam em um patamar máximo de aproximadamente  $3,7 \text{ g km}^{-1}$ .

Para os veículos dessa fase o fator calculado foi de  $7,2 \times 10^{-6} \text{ g km}^{-2}$ , sendo equivalente a  $0,578 \text{ g km}^{-1}$  para um acúmulo de 80.000 km. O fator de degradação adotado pelo IEV para o CO é de  $0,263 \text{ g km}^{-1}$  para 80.000km. Nota-se uma diferença significativa entre os valores, apesar de utilizarem o mesmo princípio para sua estimativa. Observa-se, porém, que o fator do IEV foi determinado pelos fabricantes com uso dos veículos até 80.000 km e o fator proposto foi estimado usando amostras em condições de uso com acúmulo de quilometragem superior a 80.000 km, demonstrando dessa maneira diferenças na curva de degradação dos veículos com o seu uso.

Esse processo foi executado para os veículos gasolina e *flex fuel* das fases L2, L3 e L4 para as emissões de CO, THC, NO<sub>x</sub> e aldeídos. Os fatores das equações são apresentados no APÊNDICE 8.

Observa-se que para os veículos *flex fuel* da fase L3, com uso de etanol, os dados experimentais das análises de aldeídos foram inconclusivos, devido à dispersão entre as comparações. Assim, foram adotados os fatores de emissão do IEV e fator de majoração das emissões após o décimo ano para essa categoria de veículos. Os veículos dedicados a etanol das fases L2 e seguintes possuem uma participação pouco significativa na frota, conforme dados da FIGURA 7. Para essa categoria de veículos não se realizaram ensaios experimentais. Assim, para estimar o fator de emissões, utilizou-se o critério de degradação do IEV e inclusão da taxa de majoração das emissões após o décimo ano de uso, simulando a participação de veículos alto emissores na frota.

FIGURA 64 – FATOR DE EMISSÃO PARA O CO EM VEÍCULOS LEVES DA FASE L3 ANO DE FABRICAÇÃO 1998



FONTE: O autor (2017).

NOTA: Estimativa dos fatores de emissão para o CO de acordo com IEV, Tese e Tese com alto emissor (A); Ajuste de dados combinados para obtenção do fator de emissões proposto (B).

### C) Veículos leves das fases L5 e L6

Uma das características que diferem as fases L5 e L6 das demais é a redução acentuada no limite de emissões de NMHC e NO<sub>x</sub>. Quando comparadas com a fase L4 observa-se uma redução nas emissões de NMHC em 3,2 vezes, quando o limite de emissões passou de 0,16 g km<sup>-1</sup> (fase L4) para 0,05 g km<sup>-1</sup> (fases L5 e L6). Devido a essa mudança nos níveis de emissões e veículos dos anos de fabricação mais recentes não terem atingido a faixa de 80.000 km acumulados do fator de emissões proposto pelo IEV, adotou-se como fator de degradação dessas fases os dados experimentais deste trabalho combinados ao fator de emissão do veículo novo (IEV). Não sendo utilizados os fatores de deterioração apresentados no IEV.

Utilizando-se os dados experimentais dos veículos das fases L5 e L6 e informações de veículos novos (CETESB), determinou-se o fator calculado para as emissões regulamentares. Pela combinação desse fator com as estimativas de acúmulo de quilometragem, fatores de emissão dos veículos novos do IEV e taxa de majoração das emissões foram geradas as estimativas de degradação.

Na TABELA 22 observam-se os fatores calculados a serem utilizados para compor os fatores de emissões dos veículos leves de passageiros das fases L5 e L6. Apresentam-se, ainda, os valores para um acúmulo de quilometragem de 80.000 km para propiciar uma comparação com os fatores de deterioração utilizados pelo IEV (MMA, 2014). Com exceção para o  $\text{NO}_x$ , os demais fatores de degradação propostos são inferiores aos apresentados pelo IEV.

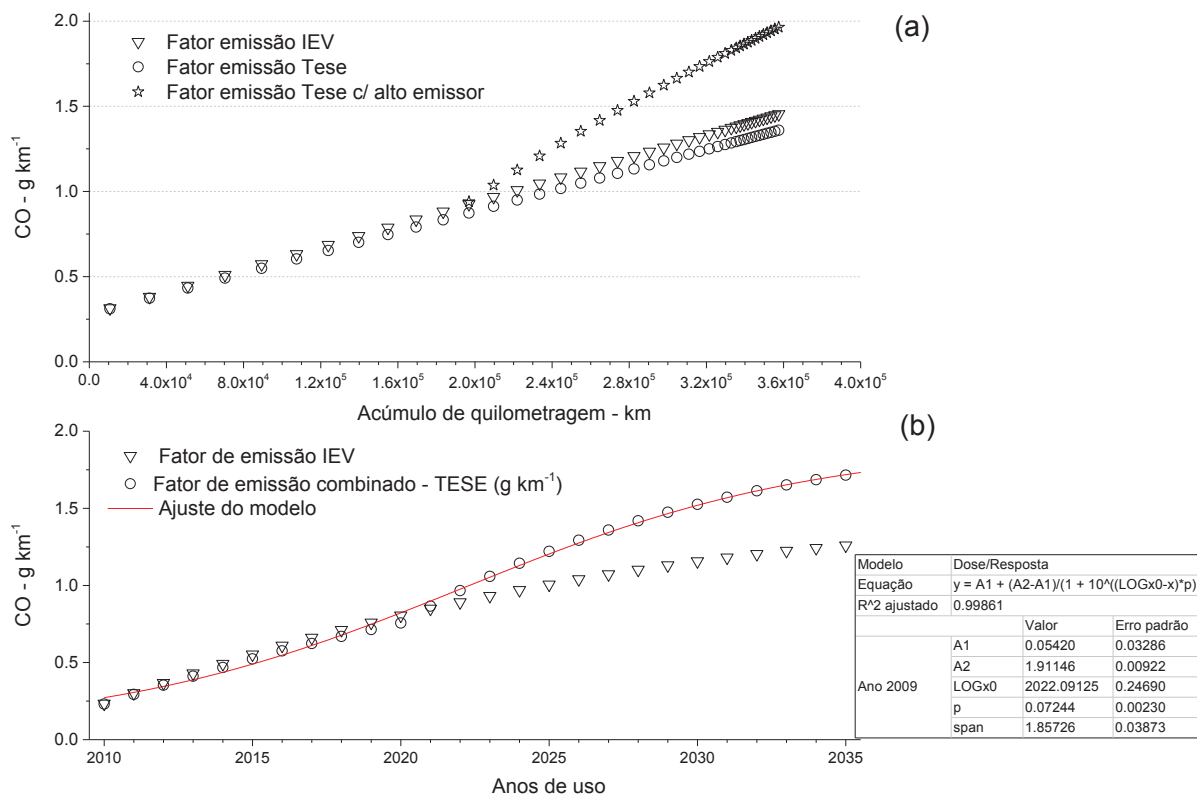
TABELA 22 – FATOR CALCULADO UTILIZADO PARA CÁLCULO DA DEGRADAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DAS FASES L5 E L6

Compostos	Gasolina A22		Fator de degradação IEV para 80.000km ( $\text{g km}^{-1}$ )	Etanol hidratado		Fator de degradação IEV para 80.000km ( $\text{g km}^{-1}$ )
	Fator calculado ( $\text{g km}^{-2}$ )	Fator degradação para 80.000km ( $\text{g km}^{-1}$ )		Fator calculado ( $\text{g km}^{-2}$ )	Fator degradação para 80.000km ( $\text{g km}^{-1}$ )	
NMHC	$1,37 \times 10^{-7}$	0,011	0,023	$1,89 \times 10^{-7}$	0,015	0,024
$\text{NO}_x$	$7,00 \times 10^{-6}$	0,056	0,030	$3,53 \times 10^{-7}$	0,028	0,020
CO	$3,02 \times 10^{-6}$	0,242	0,263	$2,17 \times 10^{-6}$	0,173	0,224
Aldeídos	$4,78 \times 10^{-9}$	0,00038	0,00065	$2,98 \times 10^{-8}$	0,00238	0,00276

FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 65 apresentam-se os valores de emissão de CO calculados para veículos *flex fuel* abastecidos com gasolina fabricados no ano de 2010. Observam-se na FIGURA 65 (a) as projeções dos fatores do IEV e tese sem a adição do fator de majoração pelos veículos alto emissores. Após o décimo ano, aproximadamente 200.000 km, são incluídos os fatores a serem combinados considerando a inclusão dos veículos alto emissores. Na FIGURA 65 (b) observa-se o fator já ajustado para os dados da tese e o fator do IEV de acordo com os anos de uso. A estabilização das emissões ocorre em aproximadamente  $1,9 \text{ g km}^{-1}$  para o ano de fabricação apresentado.

FIGURA 65 – FATOR DE EMISSÃO EM VEÍCULOS *FLEX FUEL* DA FASE L5 ANO DE FABRICAÇÃO 2010, COM USO DE GASOLINA



FONTE: O autor (2017).

NOTA: Estimativa dos fatores de emissão para o CO de acordo com IEV, Tese e Tese com alto emissor (A); Ajuste de dados combinados para obtenção do fator de emissões proposto e fator de emissão do IEV (B).

#### D) Fatores de emissão para hidrocarbonetos do tipo não metano (NMHC) e metano (CH<sub>4</sub>)

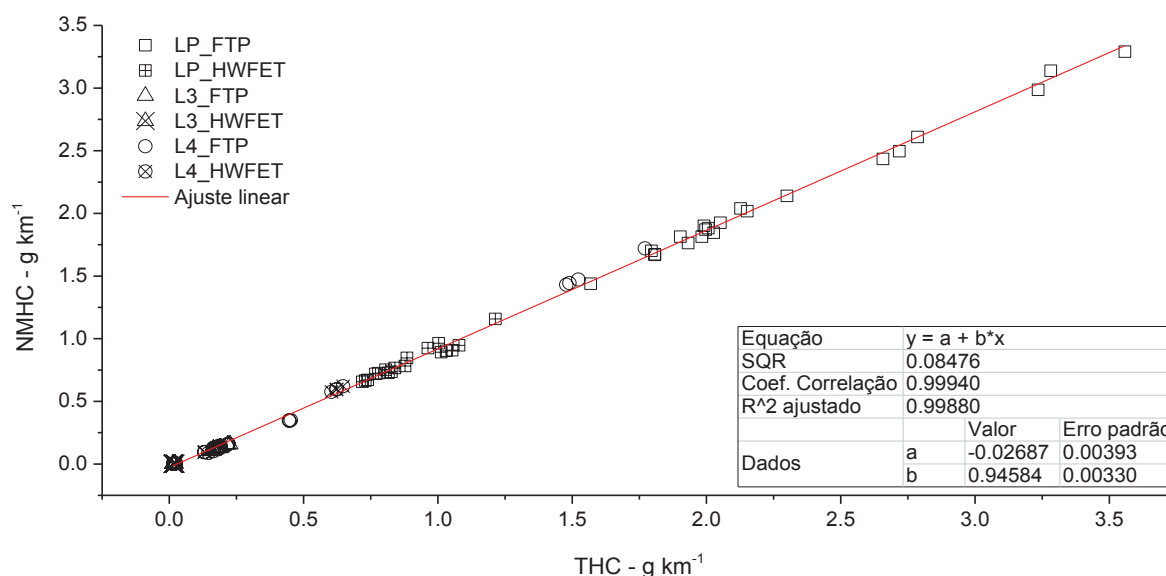
Para estimar os fatores de emissão de NMHC nos veículos leves de passageiros foram utilizadas as premissas adotadas para os motocicletas, ou seja, uso de uma correlação dessas emissões com as emissões de THC.

Conforme observado anteriormente, as fases L5 e L6 apresentaram uma redução acentuada no limite de emissões de NMHC, quando comparadas à fase L4. Devido a essa mudança nos níveis de emissões, as correlações das fases L5 e L6 foram executadas separadamente das demais.

Na FIGURA 66 observam-se os dados da correlação entre as emissões de THC e NMHC para veículos pertencentes às fases PP, L3 e L4 utilizando-se de etanol hidratado. Os dados estão identificados por fases e ciclos usados. Observa-

se que os dados de emissões das diferentes fases do PROCONVE e utilizando dois ciclos distintos, urbano (FTP 75) e estrada (HWFET), são lineares, possibilitando o uso da regressão para estimar os valores de NMHC em projeções a partir dos dados das emissões de THC. A relação apresentada será usada para veículos das fases PP, L1, L2, L3 e L4.

FIGURA 66 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES PP, L1, L2, L3 E L4, USANDO ETANOL



FONTE: O autor (2017).

No APÊNDICE 9 apresentam-se as demais correlações para as fases L5 e L6, bem como se utilizando gasolina A22. Na TABELA 23 observam-se os coeficientes da regressão linear para estimativas das emissões de NMHC a partir das emissões de THC, bem como valor do coeficiente de correlação ajustado ( $R^2$ ) de acordo com a fase e combustível utilizado.

TABELA 23 – DADOS DA REGRESSÃO PARA ESTIMATIVAS DA EMISSÃO DE NMHC A PARTIR DAS EMISSÕES DE THC

Combustível	Fases	Coeficientes da regressão		R <sup>2</sup> ajustado
		a	b	
Etanol	PP, L1, L2 L3, L4	-0,02687	0,94584	0,99880
	L5, L6	-0,00721	0,80075	0,97440
Gasolina	PP, L1, L2 L3, L4	-0,01689	0,96215	0,99931
	L5, L6	-0,00197	0,90578	0,98659

FONTE: O autor (2017).

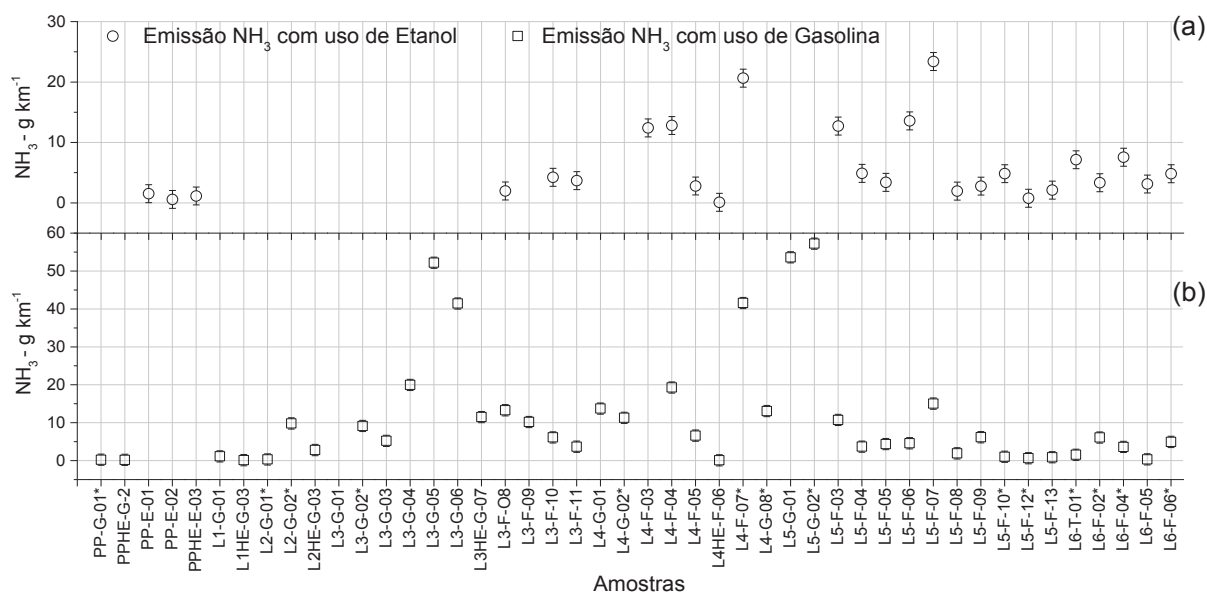
Para estimar as emissões de CH<sub>4</sub>, adotou-se o método já apresentado para os motocicletos, ou seja, reduzindo-se a emissão de NMHC das emissões de THC.

#### E) Fatores de emissão para amônia

Nos veículos leves de passageiros executaram-se os ensaios com uso da técnica de FTIR para determinação das emissões de amônia utilizando-se de EHR e gasolina A22-S50. Em algumas das amostras realizaram-se repetições em duplicata ou triplicata. Com os desvios observados calculou-se a incerteza combinada do tipo A, sendo o valor obtido de 1,48 mg km<sup>-1</sup>. Na FIGURA 67 apresentam-se os resultados com uso de etanol (a) e com uso de gasolina (b). As amostras que realizaram ensaios em duplicata ou triplicata estão identificadas com asterisco (\*).

Na TABELA 24 são apresentados os valores médios por fases do PROCONVE, observando-se uma menor emissão média para as fases PP, L1 e L2. As fases PP e L1 não possuíam catalisadores para redução das emissões, e na fase L2 foi iniciado o processo de uso desse sistema de pós-tratamento. Os valores apresentados foram adotados como fatores de emissão para as respectivas fases a que pertencem. Observa-se que para as fases L1 e L2 com uso de etanol não se realizaram ensaios, sendo definidos para essas o mesmo valor da fase PP. A estimativa de incerteza adotada superou os valores mensurados para as PP e L1.

FIGURA 67 – EMISSÕES DE AMÔNIA EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS COM USO DE ETANOL E GASOLINA



FONTE: O autor (2017).

TABELA 24 – EMISSÕES MÉDIAS DE NH<sub>3</sub> COM USO DE GASOLINA E ETANOL - VEÍCULOS LEVES POR FASE DO PROCONVE

Fases PROCONVE	Gasolina A22-S50		EHR	
	NH <sub>3</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	U <sub>A</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	U <sub>A</sub> (mg km <sup>-1</sup> )
PP	0,2	1,5	1,1	1,5
L1	0,6	1,5	-	-
L2	4,3	1,5	-	-
L3	17,3	1,5	3,3	1,5
L4	15,1	1,5	9,8	1,5
L5	13,3	1,5	7,0	1,5
L6	7,4	1,5	5,2	1,5

FONTE: O autor (2017).

Borsari e Assunção (2017) realizaram ensaios para determinar a emissão de amônia em um veículo da fase L5, usando gasolina A22-S50 e etanol com o mesmo protocolo de ensaios empregado nesta pesquisa. Os valores médios de emissão foram de 3,3 mg km<sup>-1</sup> e 3,8 mg km<sup>-1</sup>, respectivamente para gasolina e etanol. Os autores indicam limitações do estudo devido às características do equipamento usado, que não permitia a análise instantânea do gás amostrado. Devido à reatividade desse composto, a literatura recomenda que sejam efetuadas leituras instantâneas do composto, evitando-se subestimar os valores de emissão (CARB, 2007). Outras pesquisas apresentam valores de emissão entre 1,5 mg km<sup>-1</sup> a 33,5

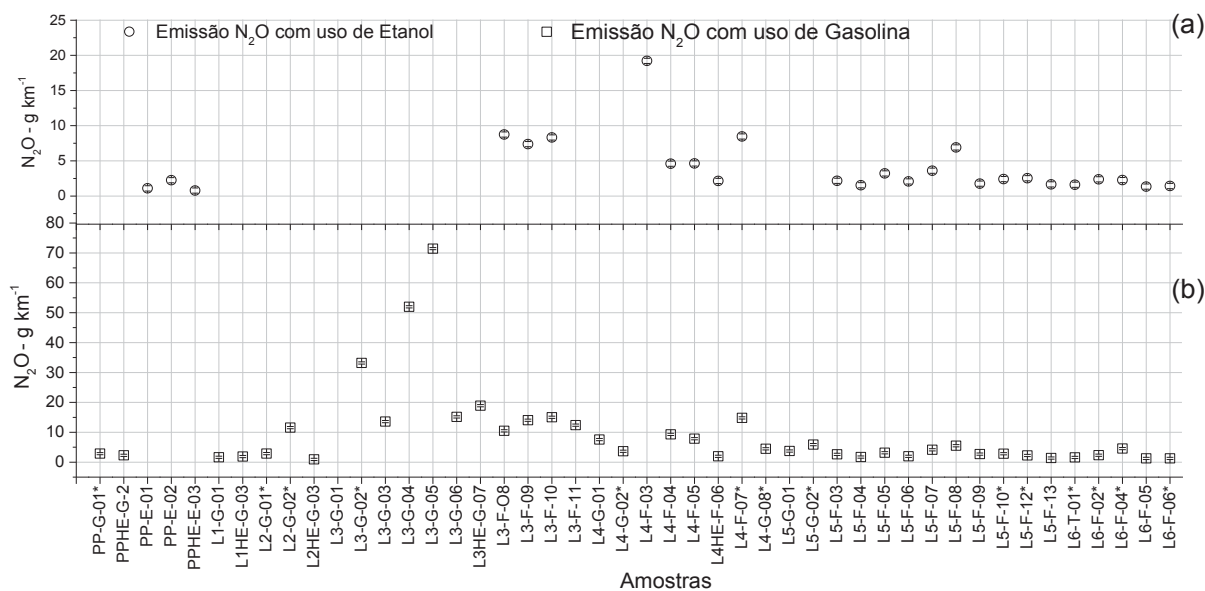


mg km<sup>-1</sup> com uso de gasolina sem adição de etanol e utilizando o mesmo protocolo de ensaios desta pesquisa (DURBIN et al., 2002; REYES et al., 2006; LIVINGSTON; RIEGER; WINER, 2009).

#### F) Fatores de emissão para óxido nitroso

Os resultados das emissões de N<sub>2</sub>O são apresentados na FIGURA 68 (a) para uso de etanol e para uso de gasolina (b). A incerteza estimada para emissão desse composto foi de 0,37 mg km<sup>-1</sup>.

FIGURA 68 – EMISSÕES DE N<sub>2</sub>O EM VEÍCULOS LEVES COM USO DE ETANOL E GASOLINA



FONTE: O autor (2017).

Na TABELA 25 observam-se as médias de emissões de N<sub>2</sub>O agrupadas por fases do PROCONVE.

TABELA 25 – EMISSÕES MÉDIAS DE N<sub>2</sub>O COM USO DE GASOLINA E ETANOL - VEÍCULOS LEVES POR FASE DO PROCONVE

Fases PROCONVE	Gasolina A22-S50		EHR	
	N <sub>2</sub> O (mg km <sup>-1</sup> )	U <sub>A</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (mg km <sup>-1</sup> )	U <sub>A</sub> (mg km <sup>-1</sup> )
PP	2,6	0,4	1,4	0,4
L1	1,8	0,4	-	-
L2	5,1	0,4	-	-
L3	25,6	0,4	8,1	0,4
L4	7,1	0,4	7,8	0,4
L5	3,2	0,4	2,8	0,4
L6	3,5	0,4	2,3	0,4

FONTE: O autor (2017).

O inventário nacional de emissões veiculares utiliza informações da literatura nacional e internacional para estimar os fatores de emissões (IPCC, 2008; BORSARI, 2009). Para as fases L1 e L2 apresentam-se valores médios de 5,2 mg km<sup>-1</sup> e para as fases seguintes uma emissão média de 18,3 mg km<sup>-1</sup>. Outras pesquisas apresentam valores entre 7 e 178 mg km<sup>-1</sup> utilizando-se de veículos com diferentes tecnologias, gasolina sem adição de etanol e o mesmo protocolo de ensaios da presente pesquisa (BECKER et al., 1999; BEHRENTZ et al., 2004; HUAI et al., 2004).

Com relação aos fatores propostos, observa-se uma maior emissão correspondente aos veículos da fase L3. Conforme dados da literatura, essa emissão está correlacionada com a maior emissão de NO<sub>x</sub> em veículos com catalisadores envelhecidos (ODAKA; KOIKE; SUZUKI, 2000; LIPMAN; DELUCCHI, 2002). Algumas considerações adicionais são apresentadas no APÊNDICE 10 sobre esses veículos.

## 5 COMPARATIVO ENTRE COMBUSTÍVEIS

Nesse capítulo são apresentados o processo de padronização das emissões entre os combustíveis utilizados nos experimentos e uma síntese dos resultados. Os valores apresentados são discutidos, demonstrando possíveis diferenças e tendências das emissões observadas nas amostras de diferentes estados tecnológicos e condições de uso.

### 5.1 PADRONIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Conforme resultados apresentados no capítulo anterior, observou-se que as emissões apresentam diferentes patamares entre as fases do PROMOT/PROCONVE e entre algumas amostras da mesma fase. Dessa maneira, adotaram-se os procedimentos descritos a seguir para propiciar uma análise comparativa entre os tratamentos empregados.

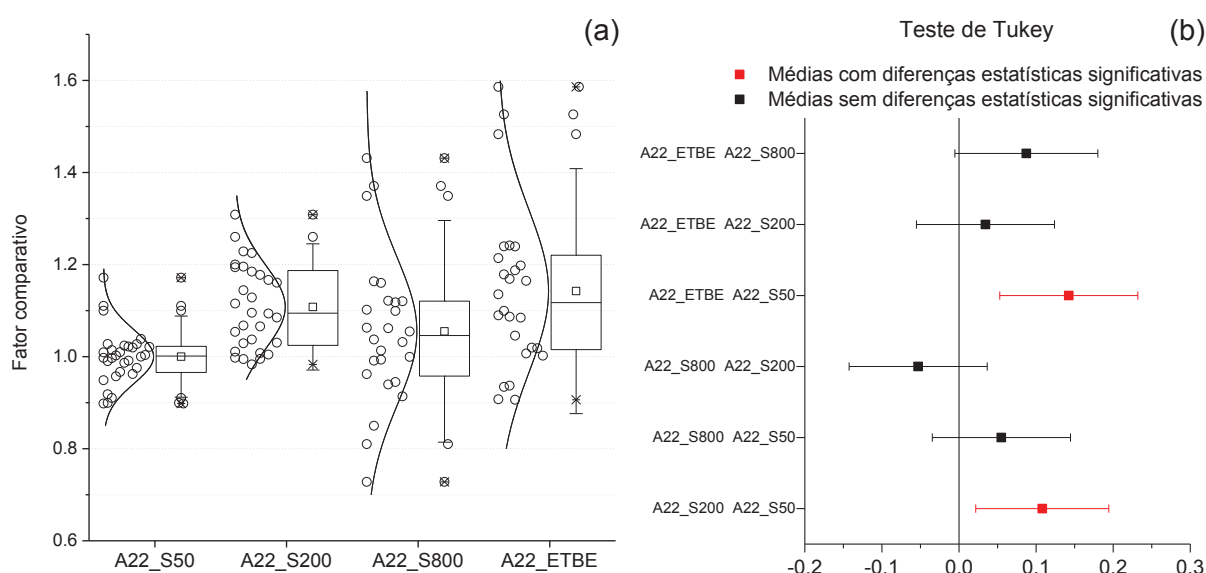
Os motocicletos foram divididos em dois grupos de acordo com similaridade de tecnologias. No primeiro grupo (G1) reuniram-se os motocicletos das fases PP, M1 e M2, devido às características do sistema de alimentação de combustível com uso de carburador e ausência de catalisadores. No outro grupo (G2), as fases M3 e M4, veículos com regulamentação de controle de emissões mais severa, necessitando uso de catalisadores e sistema de injeção eletrônica de combustível em maior parte da frota.

Para propiciar a comparação dos resultados com diferentes veículos e fases do PROMOT, adotou-se um procedimento para padronizar os valores de emissões. Utilizou-se como referência no método o combustível A22-S50, sendo que os resultados individuais das emissões com cada combustível foram divididos pelo resultado médio obtido com uso de A22-S50. Assim, os resultados de cada amostra foram padronizados com base nos resultados obtidos com essa gasolina. Dessa forma, obtém-se um valor de emissão médio igual a uma unidade com uso de A22-S50 e para os demais um fator relativo ao desempenho com esse combustível.

As mesmas premissas foram aplicadas aos veículos leves de passageiros. Sendo criados grupos separando-se os veículos das fases PP e L1 das fases L2, L3, L4, L5 e L6 devido diferenças tecnológicas. Ainda foram avaliados de forma independente os veículos dedicados à etanol.

Na FIGURA 69 apresentam-se os resultados obtidos em motocicletas para o fator comparativo das emissões de CO para o grupo G1, com utilização das gasolinas A22-S50, A22-S200; A22-S800 e A22-ETBE. Nos dados do fator comparativo, FIGURA 69 (a), observa-se um aumento de aproximadamente 10% nas emissões quando se compara o uso de A22-S200 com A22-S50. Aplicando o teste de análise de variância (ANOVA) nos dados conclui-se que existem diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Com o teste de Tukey identificou-se quais combustíveis podem ser considerados com diferenças significativas entre si. Nos resultados dessa análise, FIGURA 69 (b), observa-se que os resultados da gasolina A22-S50 podem ser considerados sem diferenças estatísticas significativas apenas quando comparados ao combustível A22-S800. O maior nível de emissões ocorreu com uso de A22-ETBE, considerado estatisticamente diferente apenas da gasolina A22-S50. O poder estatístico do teste foi de 0,97, demonstrando uma adequação do tamanho da amostra utilizada. Na FIGURA 69 (a) ainda é possível observar a existência de valores discrepantes (*outliers*), demonstrados pelos círculos acima e/ou abaixo das hastes que compõem *box plot*.

FIGURA 69 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS EM MOTOCICLOS (A) E TESTE DE TUKEY (B)

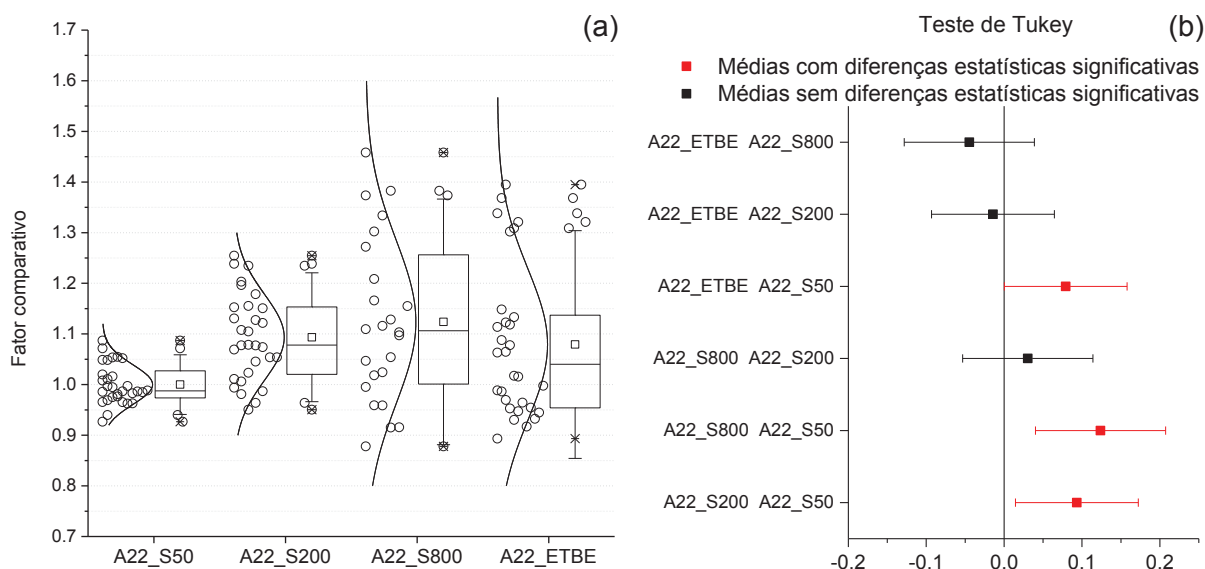


FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 70 são apresentados os resultados para os motocicletas das fases M3 e M4 (G2). Observa-se uma mudança no comportamento das emissões

quando se compara com o grupo anterior. Para os motocicletos dessa fase, o teor de enxofre no combustível apresenta influência nas emissões devido ao uso de sistemas de pós-tratamento (catalisadores) (MEJÍA-CENTENO et al., 2007; MEJÍA-CENTENO; CASTILLO; FUENTES, 2012; DAEMME et al., 2016d). O maior fator comparativo de emissões ocorre com a gasolina S800 - FIGURA 70 (a) - e, com exceção dos resultados com A22-S50, os demais combustíveis são considerados sem diferenças estatísticas significativas entre si - FIGURA 70 (b). O poder estatístico do teste foi de 0,94, sendo o menor valor obtido em todas as demais comparações efetuadas.

FIGURA 70 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS – MOTOCICLOS M3 E M4 (A) E TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

No APÊNDICE 11 são apresentados os comparativos e gráficos das emissões dos demais compostos bem como as análises para os veículos leves de passageiros.

## 5.2 SÍNTESE DO COMPARATIVO ENTRE COMBUSTÍVIES

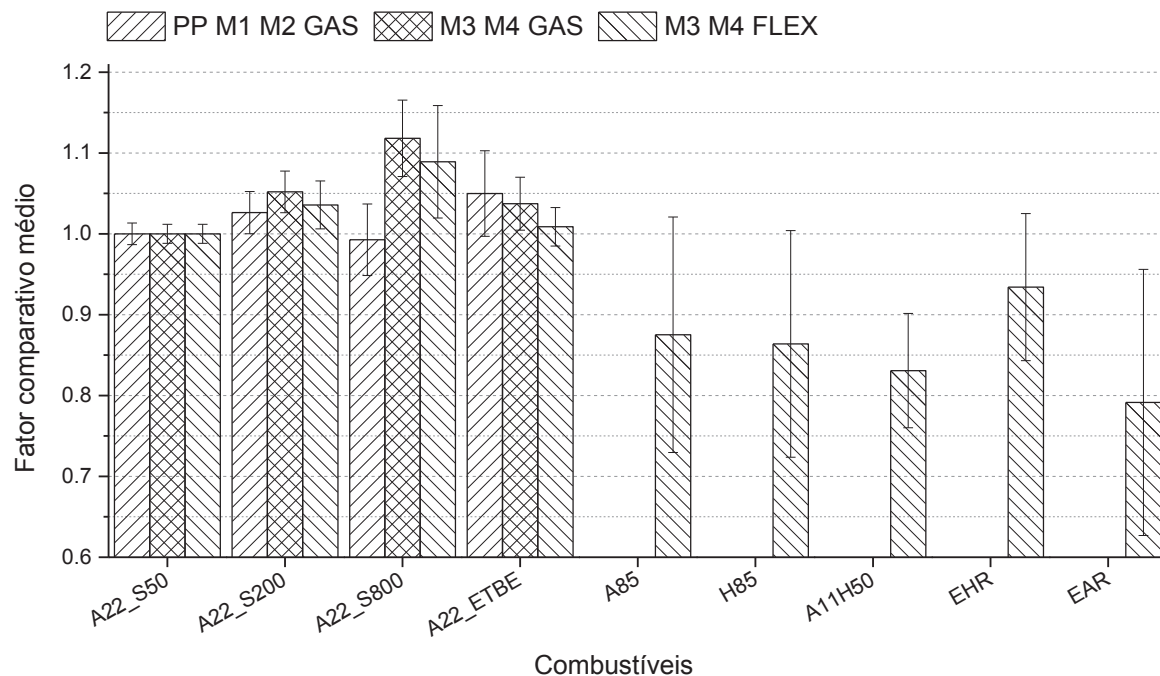
Comparando-se o uso das gasolinas nos motocicletos pertencentes às diferentes fases do PROMOT, observou-se um menor índice de emissões global para o uso da gasolina A22-S50. Nos motocicletos das fases M3 e M4 a influência do

teor de enxofre no aumento das emissões foi significativa. A gasolina com ETBE não apresentou ganhos que suscitem um estudo mais aprofundado sobre seu uso. A FIGURA 71 apresenta uma média dos fatores comparativos encontrados para o CO, THC, e NO<sub>x</sub> nos experimentos efetuados para os motocicletos, a barra de erro refere-se ao erro padrão combinado. Os motocicletos são separados em grupos conforme análises efetuadas: motocicletos das fases Pré-PROMOT, fase M1 e M2 movidos à gasolina (PP M1 M2 Gas), motocicletos gasolina das fases M3 e M4 (M3 M4 Gas) e motocicletos *flex fuel* das fases M3 e M4 (M3 M4 Flex). Nos motocicletos *flex*, devido à grande variabilidade nos resultados entre as amostras, não foi possível ter uma visão global definida, porém o fator médio apresenta uma tendência de redução das emissões utilizando maiores teores de etanol. Os ensaios realizados utilizaram uma amostra de veículos usados com desgastes impostos aos sistemas de forma geral. As grandes dispersões nos motocicletos *flex fuel* com uso de diferentes teores de etanol podem indicar problemas de reconhecimento do combustível pelo seu sistema de mapeamento, ocasionando mudanças na relação ar/combustível. Pontualmente observa-se uma maior emissão de THC para o uso de EHR, lembrando que no processo de medição desse composto são computadas as emissões de álcool não queimado. Ainda, o uso de EHR propiciou um menor índice de emissão para o NO<sub>x</sub>, quando comparado ao uso das gasolinas A22 e demais misturas.

Nos veículos leves de passageiros observa-se uma tendência mais definida, conforme FIGURA 72. Observa-se uma maior influência do teor de enxofre nas emissões com uso das gasolinas testadas. O fator médio de emissão para gasolina S800 supera a gasolina S50 em aproximadamente 40% nos veículos leves de passageiros *flex fuel*, que representam a maior participação na frota de veículos. Para os combustíveis com maior teor de etanol não foram observados ganhos diretos nas emissões. Observa-se ainda no uso de altos teores de etanol uma maior intensidade do fator comparativo de emissões para o NMHC, fato que pode ser explicado pelos resultados considerarem a emissão de álcool não queimado. Como a legislação atual permite que as emissões de álcool não queimado sejam descontadas do resultado final para composição das emissões de NMHC, uma maior emissão desse composto pode ser uma estratégia dos fabricantes de veículos para atenderem aos limites da legislação. Nas séries de emissões apresentados por CETESB (2016) observa-se uma elevação nas emissões de NMHC para os veículos

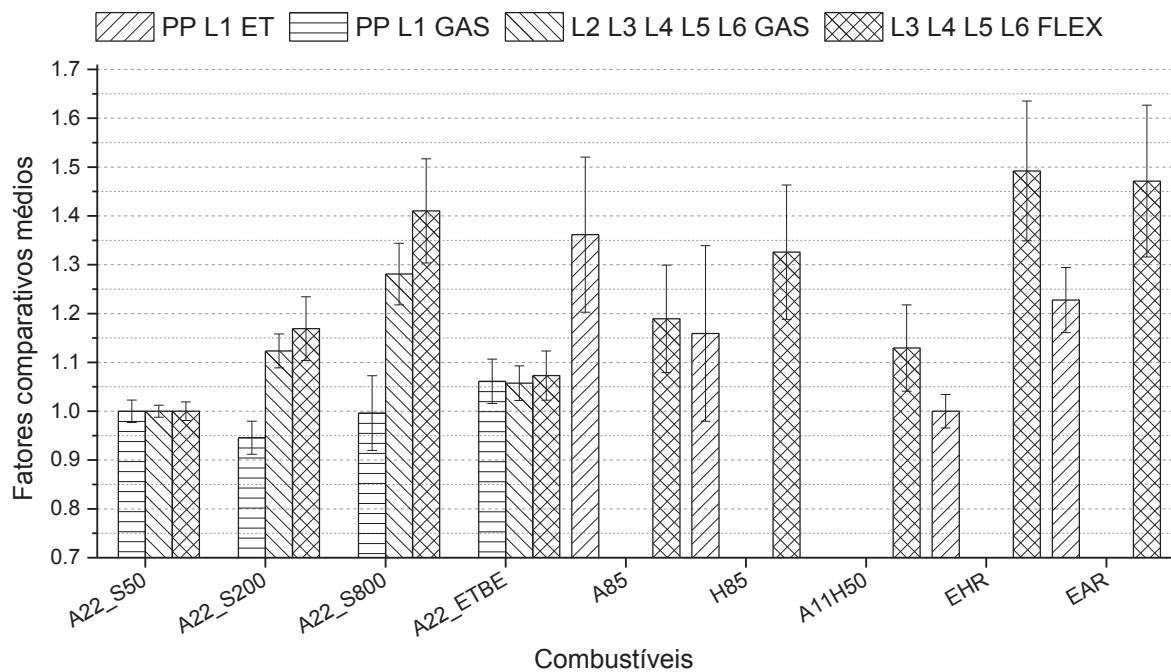
utilizando etanol a partir da fase L6 que permitiu o abatimento de ANQ das emissões de NMHC.

FIGURA 71 – FATOR COMPARATIVO MÉDIO EM MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 72 – FATOR COMPARATIVO MÉDIO EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



As diferenças entre os fatores comparativos encontrados nos diferentes teores de enxofre utilizados podem subsidiar estimativas de redução das emissões globais provocadas pela frota circulante. Dessa forma os fatores comparativos podem ser utilizados como uma correção nos fatores de emissão quando da adoção da gasolina comercial S50 para uso da frota circulante. Ainda é possível utilizar os fatores comparativos para projetar alterações nas emissões com uso dos diferentes combustíveis pesquisados.

As informações obtidas dos combustíveis: teor de etanol, densidade, teor de enxofre e poder calorífico não foram suficientes para auxiliar nas análises estatísticas multivariadas e propiciar um melhor entendimento dos resultados em relação as propriedades dos combustíveis.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE CENÁRIOS

Neste capítulo são apresentadas comparações entre a aplicação dos fatores de emissões estimados nesta pesquisa e os utilizados pelo IEV, sendo os resultados discutidos de acordo com as tendências observadas. O modelo proposto é comparado ao modelo do IEV, utilizando-se a mesma base de dados de frota, sucateamento e intensidade de uso apresentados. Ainda, apresentam-se as estimativas de emissões para compostos não inventariados, como amônia e aldeídos totais que não possuem valores típicos para motocicletas, e ao final do capítulo uma síntese sobre os resultados.

### 6.1 RESULTADOS EM MOTOCICLOS

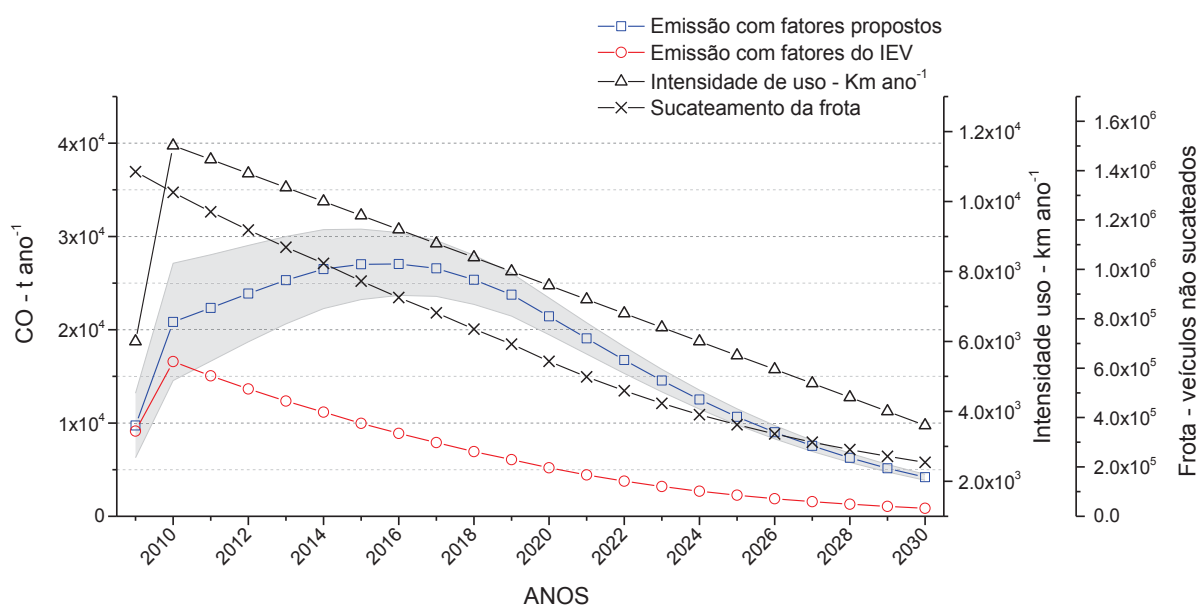
#### 6.1.1 Emissões de Monóxido de Carbono - CO

Para demonstrar de maneira pontual as diferenças e influências entre o emprego dos fatores de emissão sugeridos e os fatores de emissões utilizados pelo IEV, sem degradação das emissões com envelhecimento, efetuou-se uma comparação do comportamento da frota de motocicletas M3 a gasolina, vendida no ano de 2009. Os dados de vendas dos motocicletas desse ano foram obtidos do anuário da ABRACICLO (2013) e as informações de intensidade de uso e taxa de sucateamento dos veículos são as fornecidas no IEV. Na FIGURA 73 observam-se as projeções das emissões de CO em tonelada/ano produzidas entre os anos de 2009 e 2030, utilizando-se o fator de emissão com degradação e o fator de emissão constante do IEV. Ainda, é possível observar, para as emissões com fator de degradação, a incerteza estimada, assim como os perfis de sucateamento da frota e intensidade de uso durante o período simulado.

Nos dois primeiros anos da simulação, as emissões nos modelos podem ser consideradas sem diferenças, porém, após o terceiro ano, as emissões continuam crescentes no modelo proposto, até o ano de 2016, enquanto no modelo do IEV as emissões decrescem continuamente. Durante o período compreendido nas estimativas, 2009 a 2030, as emissões de CO somaram 145.948 toneladas e  $385.500 \pm 14\%$ , respectivamente, para os dados do IEV e fatores propostos nessa tese com degradação das emissões devido ao acúmulo de quilometragem. A diferença entre os fatores ocasionou um aumento nas projeções das emissões em

2,64 vezes, utilizando-se os fatores com degradação das emissões com o envelhecimento dos veículos. Ainda, é possível observar que o pico de emissões, para o modelo proposto, está previsto para o ano de 2016, quando a combinação do número de veículos ativos na frota, distância percorrida e fator de emissão apresentam o ponto de máxima emissão ( $27.049 \pm 12\% \text{ t ano}^{-1}$ ).

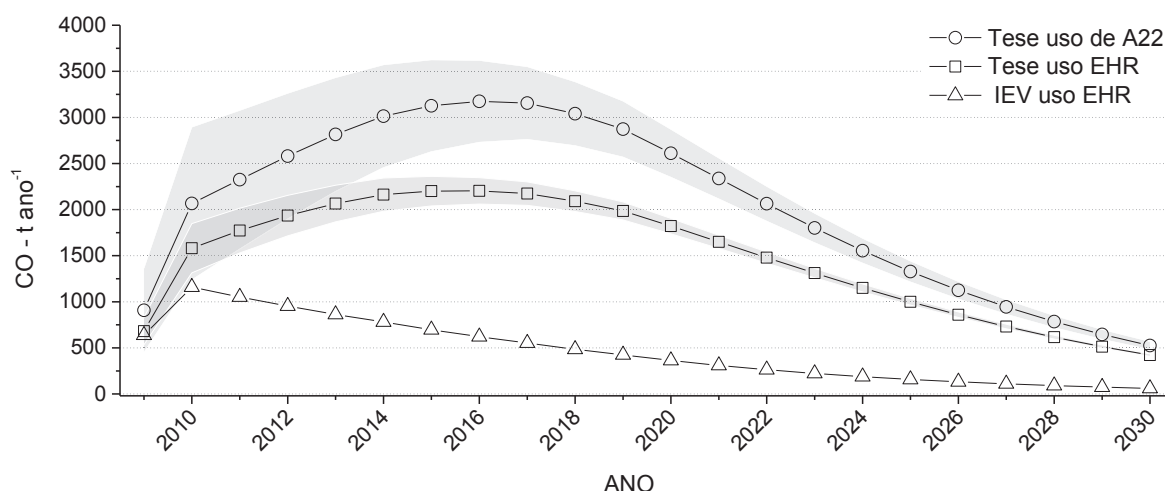
FIGURA 73 – COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO ENTRE FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS E IEV - MOTOCICLOS FABRICADOS EM 2009



FONTE: O autor (2017).

O uso de etanol combustível nos motocicletos *flex fuel* proporciona o mesmo perfil de diferenças entre os modelos do IEV e tese, mudando de magnitude devido ao fator calculado e diferenças dos fatores iniciais de emissão. A FIGURA 74 ilustra as emissões para a frota *flex fuel* produzida no ano de 2009, sendo apresentadas as emissões utilizando gasolina e fator proposto (Tese uso de A22), uso de etanol hidratado de referência com fator proposto (Tese uso EHR) e fator do inventário (IEV uso EHR). Observa-se uma maior emissão com uso de gasolina,  $44.800 \pm 16\%$  toneladas ao final de 2030. Para o uso de etanol, o modelo proposto apresenta um valor estimado em  $32.410 \pm 7\%$  toneladas e, para o modelo do IEV, 10.203 toneladas – uma diferença de 3,18 vezes entre os métodos.

FIGURA 74 – COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO ENTRE FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS E DO IEV PARA MOTOCICLOS *FLEX FUEL*



FONTE: O autor (2017).

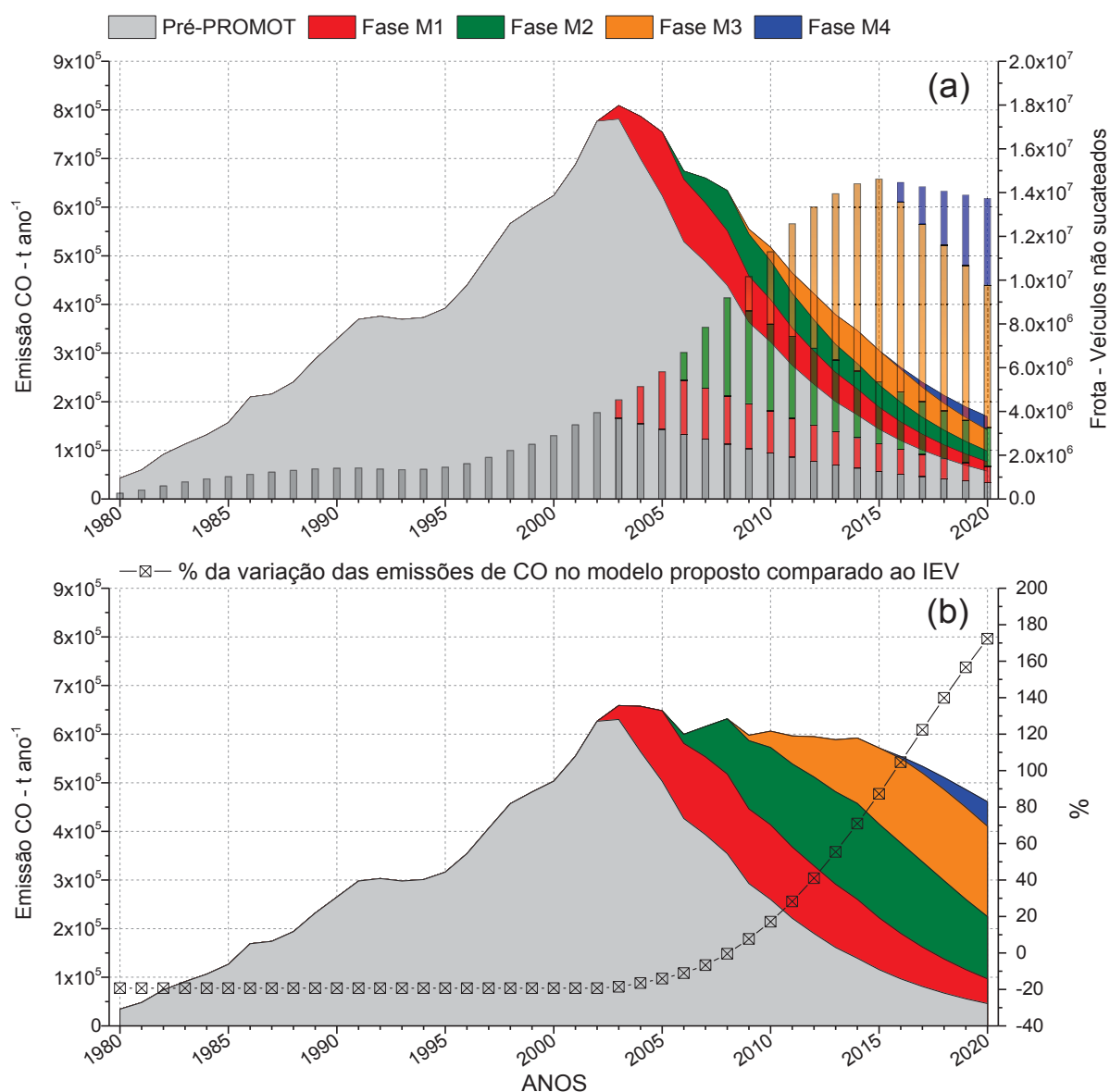
Utilizando as premissas adotadas, efetuaram-se simulações das emissões de CO para toda a frota de motocicletas. A FIGURA 75 (a) apresenta a estimativa de emissões para o modelo do IEV além da evolução da frota de motocicletas (gráfico de barras) que demonstra a participação de cada fase do PROMOT na frota. Observa-se uma preponderância das emissões da fase Pré-PROMOT (PP) e uma redução acentuada das emissões com a entrada das fases regulamentadas pelo PROMOT (M1, M2, M3 e M4) após o ano de 2003.

Na FIGURA 75 (b) observam-se as emissões no mesmo período, utilizando os mesmos dados de frota e intensidade de uso, com adoção dos fatores de emissão propostos, considerando-se a degradação das emissões com o uso dos motocicletas. Observa-se inicialmente uma redução das emissões dos motocicletas PP em aproximadamente 20%, devido à utilização de um fator de emissão menor que o proposto pelo IEV. Após o ano de 2003 é possível observar um aumento nas emissões para o modelo proposto quando comparado ao IEV. Entre os anos de 2006 e 2014 observa-se uma estabilização das emissões e, na sequência, uma redução. Porém em comparação ao IEV o aumento relativo é contínuo. A redução nas emissões totais após o ano de 2014 está relacionado, além de menores fatores de emissão, com a influência da redução na frota circulante estimada.

O modelo proposto demonstra que apenas a troca de veículos mais poluentes, pertencentes a fases anteriores do PROMOT, não é suficiente para garantir a redução das emissões globais emitidas, pois, devido à degradação dos

motores e sistemas de pós-tratamento, as emissões aumentam ao longo da vida útil dos veículos. Nesse sentido, ações como a inspeção veicular são relevantes para manter os níveis de emissões dentro de patamares preestabelecidos.

FIGURA 75 – EMISSÕES DE CO ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B) EM MOTOCICLOS



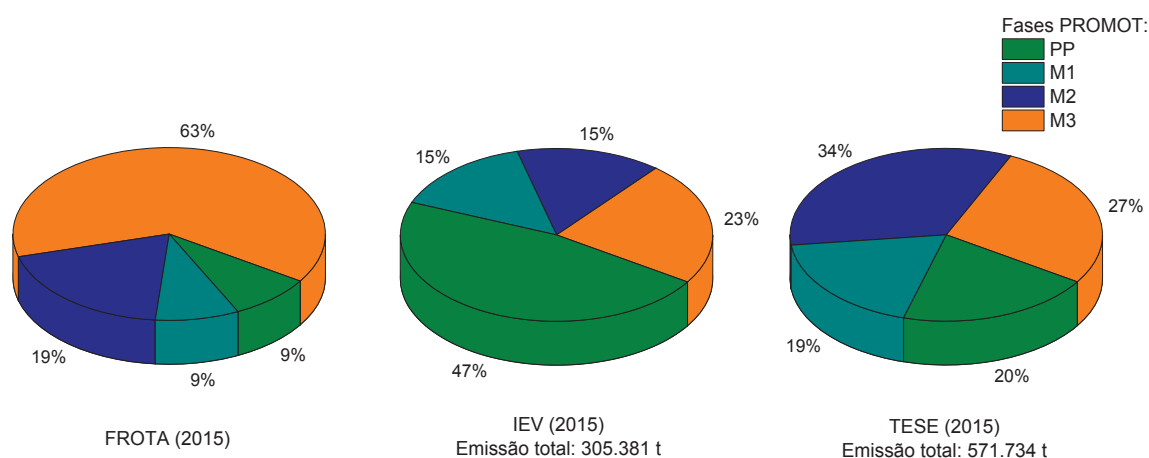
FONTE: O autor (2017).

As emissões totais de monóxido de carbono para o período demonstrado (1980/2020) não apresentaram diferença significativa entre ambos os modelos (IEV e tese), ficando as projeções do modelo proposto superiores em aproximadamente 3,5%, porém observa-se uma grande mudança no perfil das emissões, sendo que no modelo utilizado pelo IEV ocorre uma redução constante das emissões a partir de

2003, ano da entrada em vigor do PROMOT. Com o uso dos fatores propostos, observa-se a redução das emissões com a entrada do PROMOT, porém com uma redução na taxa de decaimento.

Para 2015, último ano em que os dados de frota e fatores de emissão não foram estimados, o modelo do IEV projeta uma emissão de CO de 305.381 t ano<sup>-1</sup> enquanto, com o uso dos fatores propostos, essa emissão passa para 571.734 t ano<sup>-1</sup>, demonstrando o efeito da degradação dos veículos nas emissões. Na FIGURA 76 é possível observar a composição da frota por fases do PROMOT para o ano de 2015 bem como a distribuição da emissão de CO para cada fase. Observa-se que no modelo proposto pelo IEV a maior emissão se refere aos veículos da fase PP (47%), que respondiam por apenas 9% da frota estimada. Com a utilização dos fatores como degradação e adoção de um fator de emissão menor para fase PP sua participação é reduzida para 20% e a fase M2 responde pela maior parte das emissões (34%).

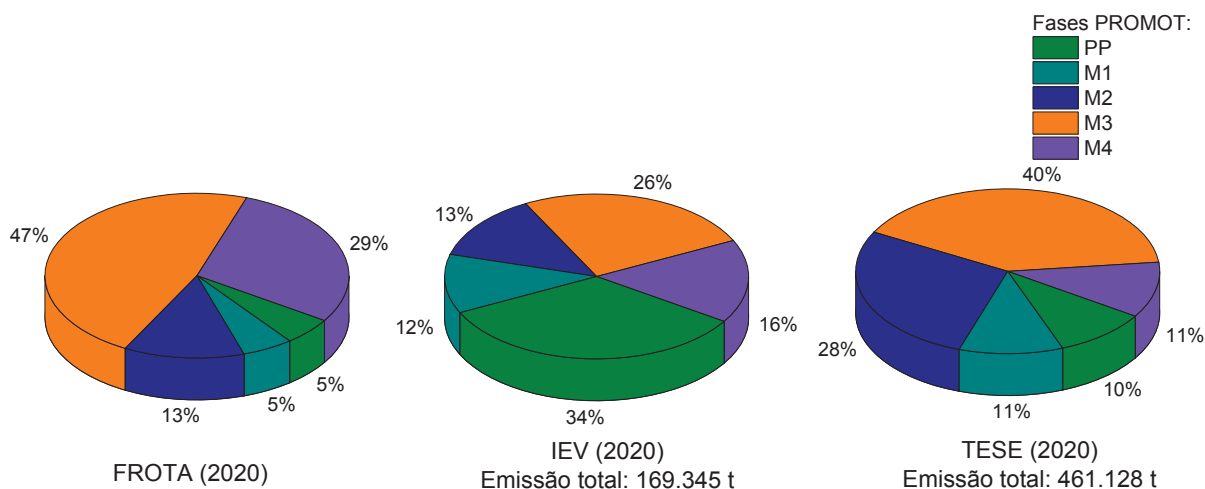
FIGURA 76 — ESTIMATIVAS DE COMPOSIÇÃO DA FROTA E DAS EMISSÕES DE CO PARA O ANO DE 2015 - MODELOS DO IEV E TESE



FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 77 apresenta detalhamento das emissões simuladas para o ano de 2020. Para o modelo do IEV a fase PP, apesar de representar apenas 5% da frota, continua como a maior responsável pelas emissões (34%). Já no modelo proposto, a maior parcela das emissões pertence à fase M3 (40%), que responde também pelo maior número de veículos ativos na frota (47%).

FIGURA 77 – ESTIMATIVAS DE COMPOSIÇÃO DA FROTA E DAS EMISSÕES DE CO PARA O ANO DE 2020 - MODELOS DO IEV E TESE



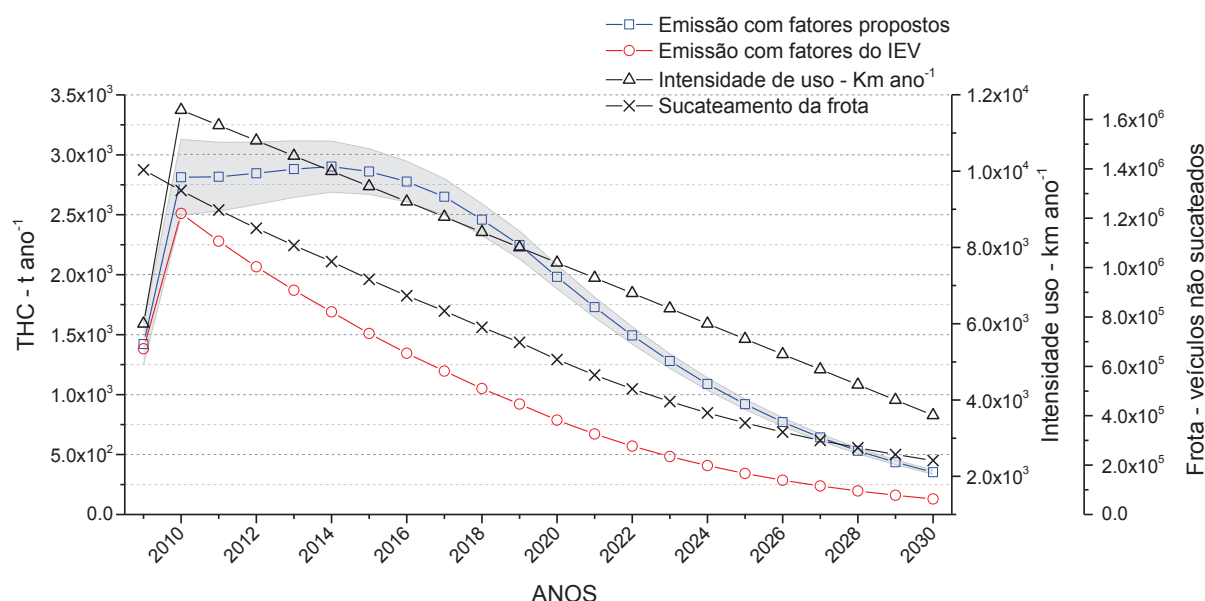
FONTE: O autor (2017).

### 6.1.2 Emissões de Hidrocarbonetos Totais – THC

Efetuada-se um comparativo entre os fatores de emissão propostos, com degradação das emissões com acúmulo de quilometragem, e os fatores constantes do IEV (MMA, 2014) para os motocicletas fabricados no ano de 2009, seguindo as premissas apresentadas no comparativo para as emissões de CO, obtém-se o perfil de emissões da FIGURA 78. Com o uso dos fatores propostos, a emissão no período 2009/2030 atinge  $48.899 \pm 7\%$  toneladas e, com os fatores do IEV, 22.093 toneladas – uma diferença de 1,8 vezes. Ainda, é possível observar que, nos dois primeiros anos, as emissões dos modelos podem ser consideradas sem diferenças e que a maior emissão em toneladas/ano ocorre em 2014 para o modelo proposto.

Na FIGURA 79 (a) observam-se as emissões de THC projetadas pelos fatores de emissão do IEV (MMA, 2014 e dados da CETESB, 2016), com o ponto de maior emissão no ano de 2003 ( $107.328 \text{ t ano}^{-1}$ ) e depois uma redução contínua com a entrada do programa para redução das emissões (PROMOT). Note-se que as projeções do IEV (MMA, 2014) não contemplam as emissões de THC, sendo os dados desse composto usados para estimar as emissões de NMHC.

FIGURA 78 — COMPARATIVO DA EMISSÃO DE THC ( $\text{g km}^{-1}$ ) ENTRE FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS E DO IEV

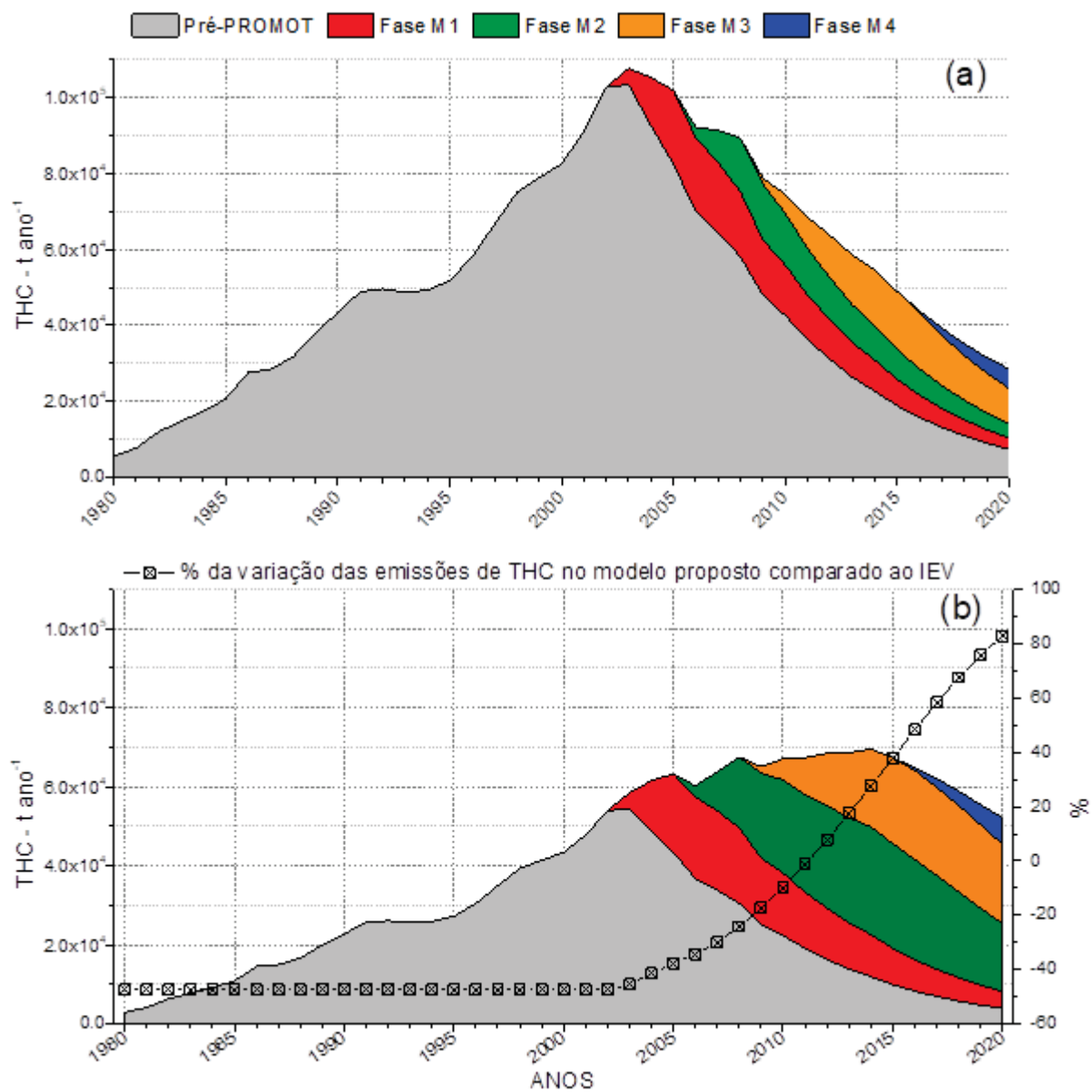


FONTE: O autor (2017).

Com o uso dos fatores de emissão propostos, observa-se na FIGURA 79 (b) uma redução na estimativa das emissões de THC para a fase PP, fato devido ao fator arbitrado pelo IEV para essa fase ser de  $2,60 \text{ g km}^{-1}$  constante ao longo da vida dos motocicletos, valor esse 89% superior ao estimado neste estudo. Já para as demais fases é possível observar um aumento das emissões com avanço dos anos, explicado pela consideração da degradação das emissões ao longo do tempo. As emissões com uso dos fatores propostos superam o modelo do IEV após o ano de 2011. O pico das emissões ocorre no ano de 2014,  $69.515 \text{ t ano}^{-1}$ , contra  $54.538 \text{ t ano}^{-1}$  no modelo do IEV.

Na FIGURA 80 observam-se as projeções acumuladas das emissões entre 1980 e 2020 com os dois métodos, fatores do IEV e propostos por esse estudo. Observa-se um aumento das emissões com o uso dos fatores propostos a partir da fase M1, devido ao fato de o modelo inserir a estimativa da degradação das emissões ao longo dos anos.

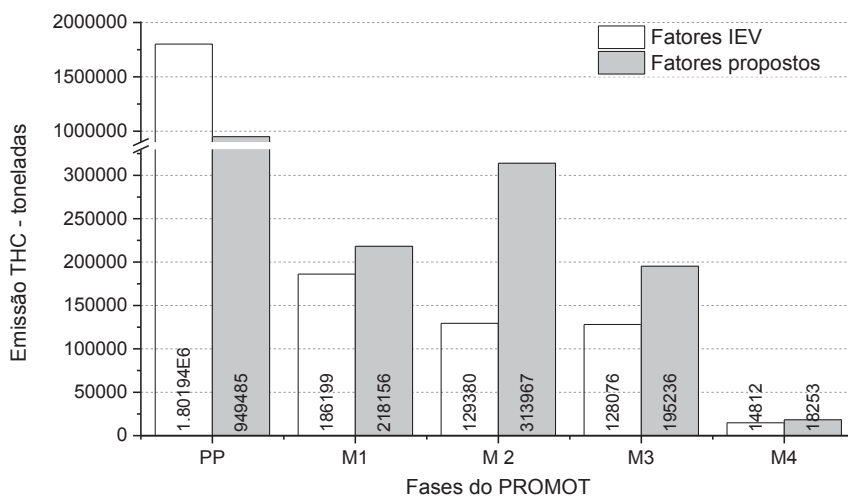
FIGURA 79 – EMISSÕES DE THC ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B) EM MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).



FIGURA 80 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES ACUMULADAS DE THC ENTRE 1980 E 2020 EM MOTOCICLOS POR FASES DO PROMOT

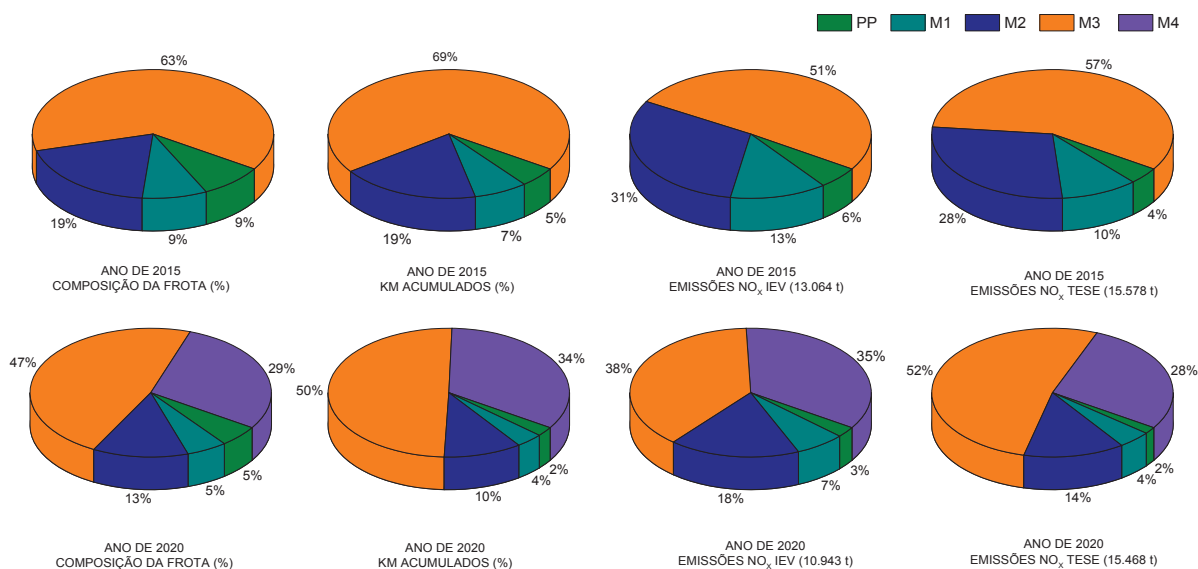


FONTE: O autor (2017).

### 6.1.3 Emissões de Óxidos de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>

Na FIGURA 81 apresentam-se dados comparativos, em porcentagem, da composição da frota, quilômetros acumulados e emissões por fases do PROMOT. As emissões em ambos os modelos (IEV e tese) são próximas para o ano de 2015 e proporcionais aos dados da frota e distâncias percorridas. Já para o ano de 2020, as emissões do modelo proposto superam os valores do IEV em aproximadamente 40%, sendo a fase M3 a responsável por maior parte das emissões (52%).

FIGURA 81 – COMPARATIVO DA FROTA, Km ACUMULADOS E EMISSÕES PARA OS ANOS DE 2015 E 2020

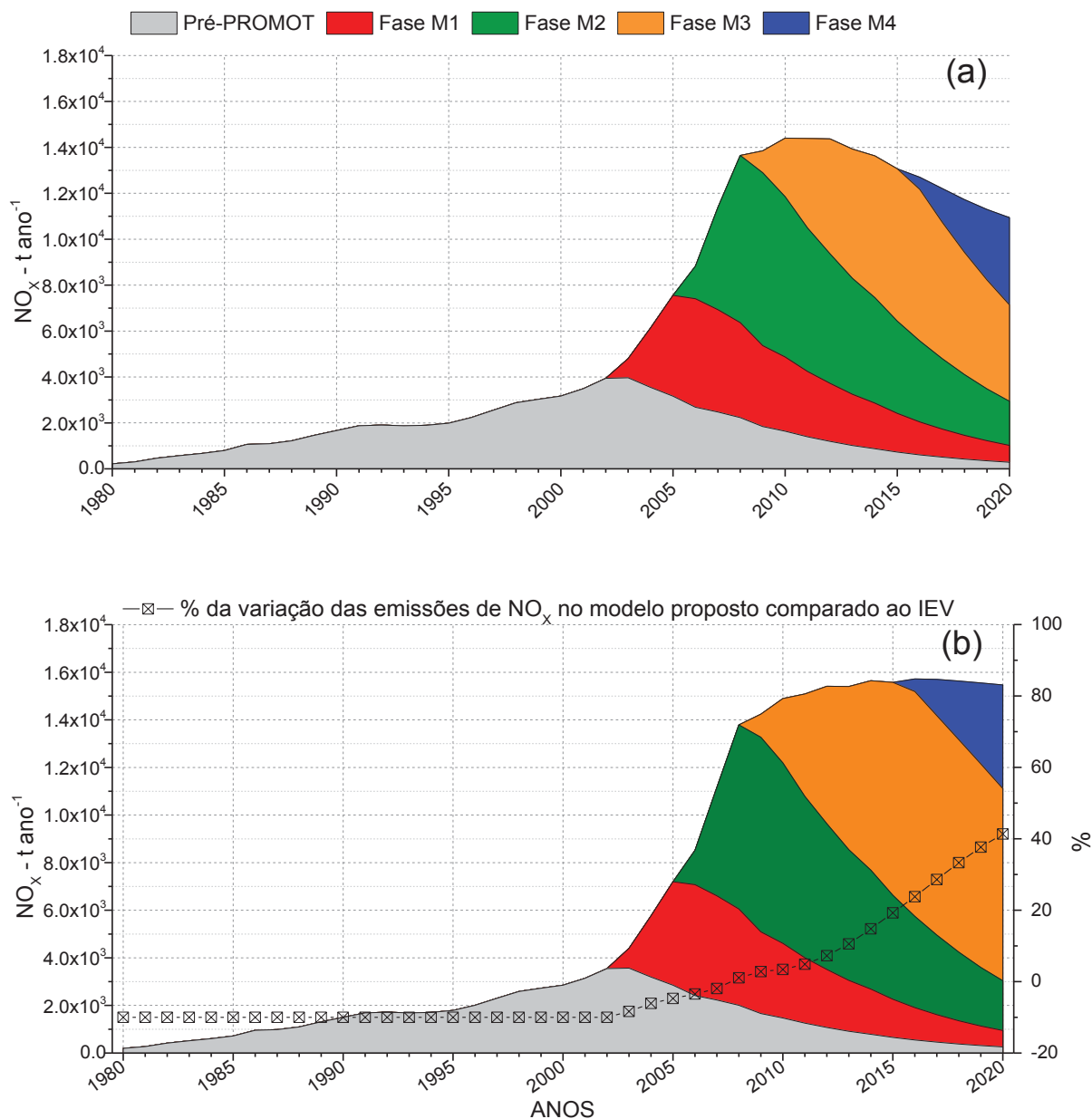


FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 82 (a) apresenta os dados das emissões de NO<sub>x</sub> entre os anos de 1980 e 2020, para o modelo do IEV. Observa-se uma elevação acentuada das emissões entre os anos de 2003 e 2008, com maior influência do crescimento da frota, visto que os fatores de emissão nesses anos são da mesma magnitude. A partir de 2009 observa-se uma tendência à estabilização e uma redução constante a partir de 2013.

Na FIGURA 82 (b) pode-se observar que o padrão de emissões no modelo proposto mantém o perfil e magnitude das emissões geradas pelo modelo do IEV até o ano de 2008. Nesse ano as emissões do modelo do IEV somam 13.648 toneladas e as do modelo proposto 13.791 toneladas. Após o ano de 2008 observa-se uma elevação constante das emissões no modelo proposto até o ano de 2014, seguido de uma tendência de estabilização, sendo que para o ano de 2020 as projeções do modelo proposto superam em 40% as estimativas do IEV.

FIGURA 82 – EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B)



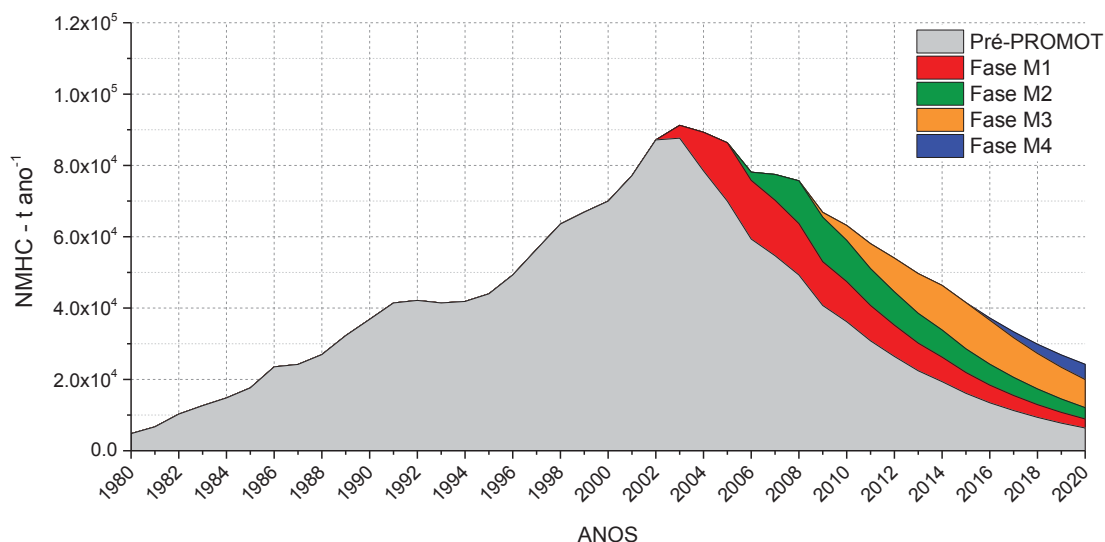
FONTE: O autor (2017).

#### 6.1.4 Emissões de Hidrocarbonetos do Tipo Não Metano - NMHC

Os fatores de emissão para o NMHC usados pelo IEV são menores que os propostos neste estudo, pois utilizam o fator de conversão THC→NMHC de 0,85 (MMA, 2014), com exceção para a fase PP. Como os fatores de emissão adotados

pelo IEV são constantes ao longo do tempo, essa razão se mantém para todas as fases e níveis de emissão, sendo o perfil das emissões apresentado na FIGURA 83.

FIGURA 83 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE NMHC ENTRE 1980 E 2020 UTILIZANDO FATORES DE EMISSÃO DO IEV

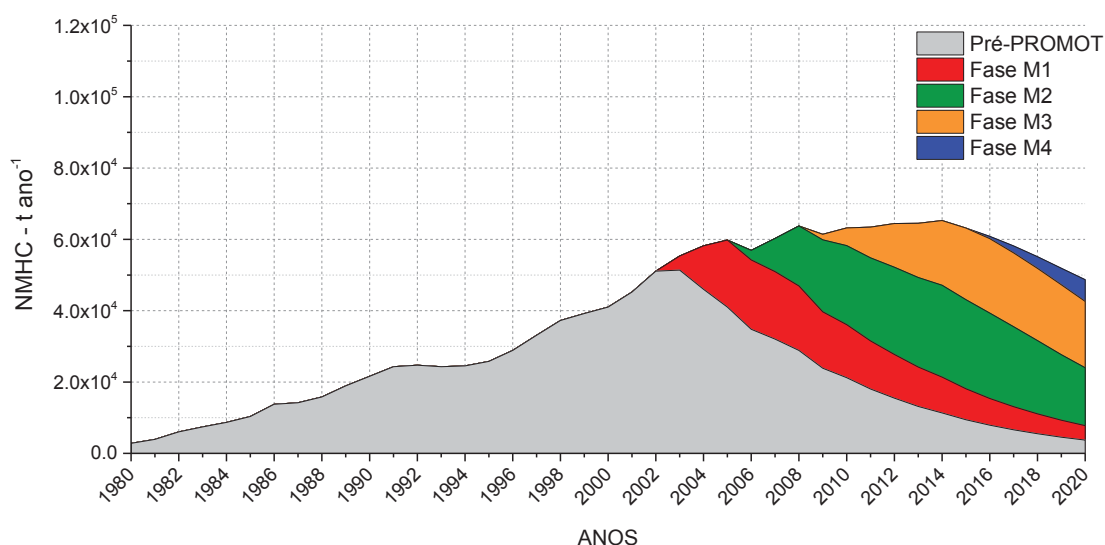


FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 84 apresenta as projeções das emissões com o modelo proposto. Observa-se a estabilização das emissões entre os anos de 2008 e 2014, e depois uma redução contínua. Comparando-se os modelos, observa-se uma maior emissão de NMHC com dados do IEV até o ano de 2011; depois, o cenário se altera, onde, utilizando-se os fatores de emissão propostos, as emissões são superiores. Conforme já descrito para as emissões de THC, a maior diferença ocorre com os valores da fase PP, devido ao valor elevado, arbitrado no IEV, para essas emissões (THC/NMHC). Com a redução gradual da frota dessa fase, ocorre a mudança de cenário, tornando-se maiores as emissões com o uso dos fatores propostos.

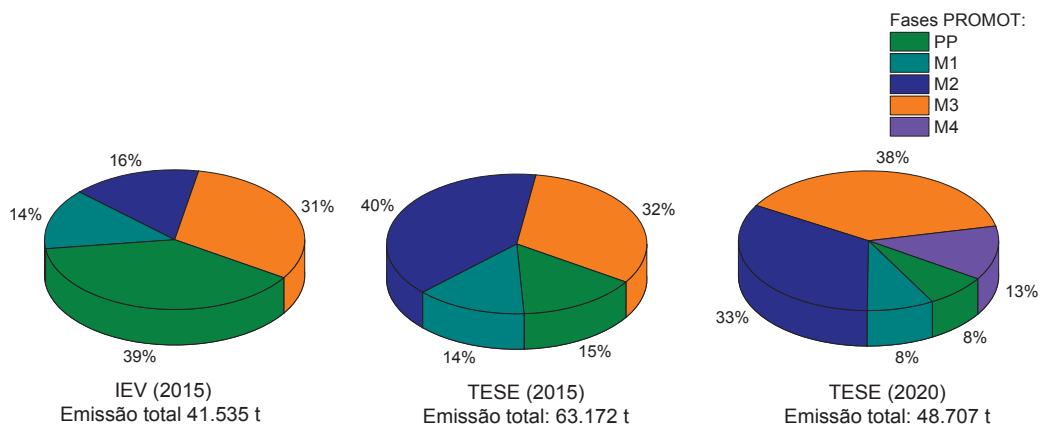
A FIGURA 85 apresenta a contribuição das diferentes fases do PROMOT nas emissões de NMHC para o ano de 2015, com dados do modelo do IEV e fatores estimados no presente estudo. Nos dados projetados pelo IEV, observa-se que a fase PP é responsável por 39% das emissões, sendo que essa fase participa com 9% da frota nesse ano, conforme FIGURA 76. Confrontando as emissões no ano de 2015, observa-se que o modelo proposto no presente estudo apresenta um acréscimo de 52% comparado aos dados do IEV. Já para o ano de 2020, observa-se uma projeção de redução das emissões, comparadas ao ano de 2015 no mesmo modelo, com maior participação da fase M3.

FIGURA 84 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE NMHC ENTRE 1980 E 2020 UTILIZANDO FATORES DE EMISSÃO DO MODELO PROPOSTO



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 85 – ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES DE NMHC PARA OS ANOS DE 2015 E 2020 USANDO DADOS DO IEV E TESE



FONTE: O autor (2017).

#### 6.1.5 Emissões de Metano - CH<sub>4</sub>

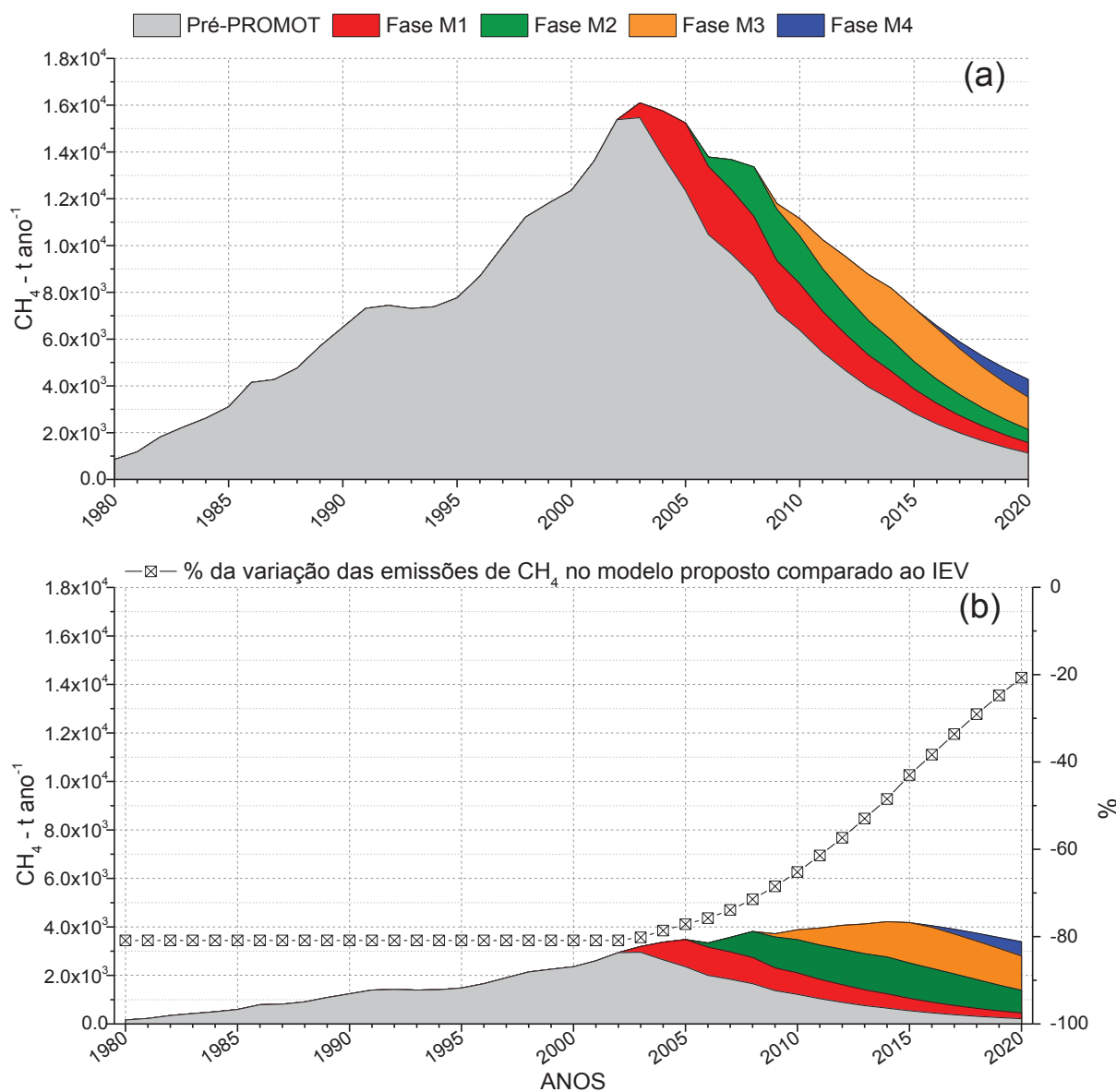
Simulações das emissões de metano nos moldes já demonstrados para os modelos do IEV e o proposto são apresentadas na FIGURA 86. A FIGURA 86 (a) apresenta o perfil das emissões de acordo com o modelo do IEV, tendo as mesmas proporções das emissões de THC e NMHC, devido ao padrão utilizado para sua

determinação ( $\text{CH}_4/\text{THC}=0,15$ ), com pico máximo no ano de 2003 (16.099 toneladas), data em que entrou em vigor o PROMOT.

Na FIGURA 86 (b) observa-se a projeção para os fatores propostos, onde o pico de emissões ocorre no ano de 2014 (4.215 toneladas), sendo que o perfil de participação das fases segue os mesmos padrões das emissões de THC e NMHC. Observa-se, ainda, uma redução quando se compara com o modelo do IEV, que apresenta um pico de 16.099 toneladas no ano de 2003 e o modelo proposto, que, nesse mesmo ano, estima 3.192 toneladas. Essas diferenças são explicadas pelos fatores de emissão iniciais estabelecidos para fase PP e a relação adotada pelo modelo do IEV que considera maior a participação do metano na composição do total de hidrocarbonetos. No modelo do IEV 15% das emissões de THC correspondem ao  $\text{CH}_4$ ; já para o modelo proposto, essa proporção fica em aproximadamente 6%.

O metano, juntamente com o  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , são os principais gases do efeito estufa. Comparando-se as emissões acumuladas de metano dos dois modelos entre 1980 e 2020, têm-se 97.624 toneladas e 339.061 toneladas, para o modelo proposto e IEV respectivamente.

FIGURA 86 – EMISSÕES DE CH<sub>4</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO DO IEV (A) E FATORES PROPOSTOS (B)



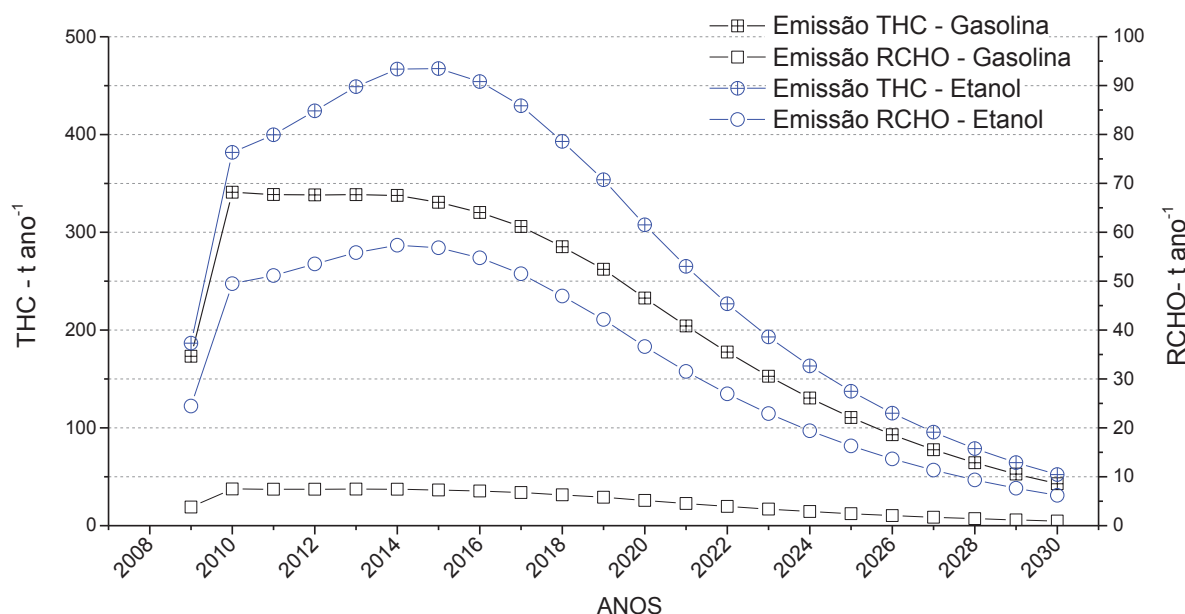
FONTE: O autor (2017).

### 6.1.6 Emissões de Aldeídos Totais - RCHO

O modelo proposto para as emissões de aldeídos segue o mesmo perfil das emissões com uso dos fatores de emissão para o THC, visto que sua estimativa está baseada nas emissões desse composto. A FIGURA 87 apresenta uma simulação das emissões de THC e RCHO para frota de motocicletas *flex fuel* da fase M3, vendida no ano de 2009. Nas projeções assumiu-se primeiramente que todos os veículos utilizariam gasolina A22, sendo efetuados cálculos da emissão de THC e aldeídos (RCHO). Depois, executou-se o mesmo procedimento para essa frota

estimando as emissões com uso de etanol. Observa-se que as emissões de THC e RCHO são superiores com uso de etanol, porém a diferença é mais expressiva para os aldeídos. A razão entre as emissões EHR/A22 para o THC ficou com um valor médio de 1,25; para os aldeídos a razão média foi de 6,77. No período simulado as emissões de aldeídos foram de 108,7 toneladas e 776,5 toneladas, respectivamente, para o uso de gasolina e etanol. Observa-se que a emissão com etanol é superior em sete vezes a estimada com uso de gasolina, ressaltando-se que a emissão desse composto não é legislada para essa categoria de veículo automotor.

FIGURA 87 – EMISSÕES DE THC E RCHO ( $\text{g Km}^{-1}$ ) ENTRE USO DE GASOLINA E ETANOL PARA MOTOCICLOS FABRICADOS EM 2009



FONTE: O autor (2017).

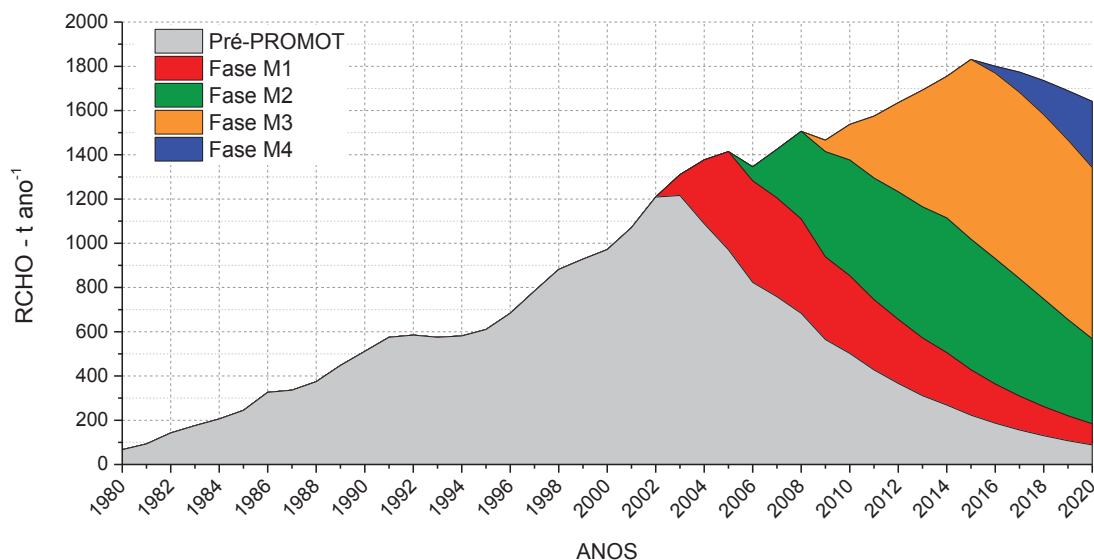
O aumento nas emissões de aldeídos está diretamente ligado ao aumento do teor de etanol no combustível, sendo que em motos *flex fuel* o uso de etanol promove uma elevação dessas emissões em até dez vezes, quando comparadas com as emissões utilizando-se gasolina A22 (DAEMME; PENTEADO; ZOTIN, 2012; DAEMME et al., 2014d, 2016c).

Efetuada-se uma simulação das emissões de RCHO entre os anos de 1980 e 2020 nos moldes já descritos, observa-se, conforme FIGURA 88, o incremento das emissões mesmo com o avanço da legislação. O ponto de máxima emissão ocorre no ano de 2015, em torno de 1.830 toneladas, seguido de uma redução contínua para os parâmetros de frota adotados. O perfil das emissões de RCHO é



semelhante ao das emissões de THC e NMHC, devido à correlação entre os compostos.

FIGURA 88 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE ALDEÍDOS TOTAIS ENTRE 1980 E 2020

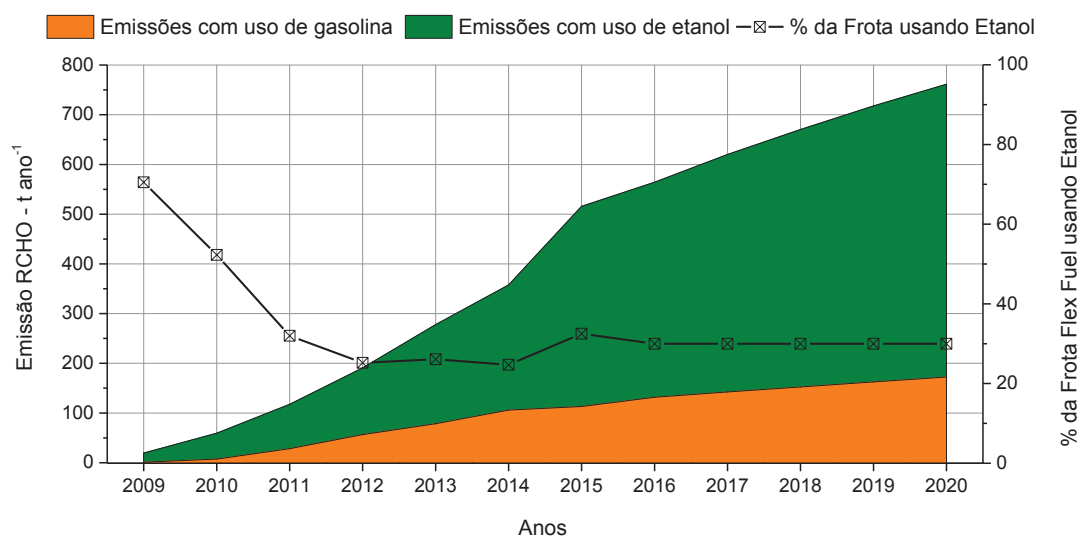


FONTE: O autor (2017).

Já nos motocicletos *flex fuel*, conforme FIGURA 89, observa-se uma estimativa de aumento das emissões de aldeídos até o ano de 2020, fato relacionado às estimativas de degradação das emissões com uso dos motocicletos e crescente participação dessa categoria na frota. Observa-se, ainda, a porcentagem de uso de etanol na frota, que mesmo sendo inferior após o ano de 2010, propicia uma emissão superior de aldeídos quando se compara com o uso da gasolina A22.

Atualmente os inventários nacionais não apresentam uma estimativa das emissões de aldeídos totais para motocicletos pela ausência de um fator de emissão para esse composto em condições locais.

FIGURA 89 – EMISSÕES DE ALDEÍDOS TOTAIS EM MOTOCICLOS *FLEX FUEL* COM USO DE ETANOL E GASOLINA ENTRE 2009 E 2020



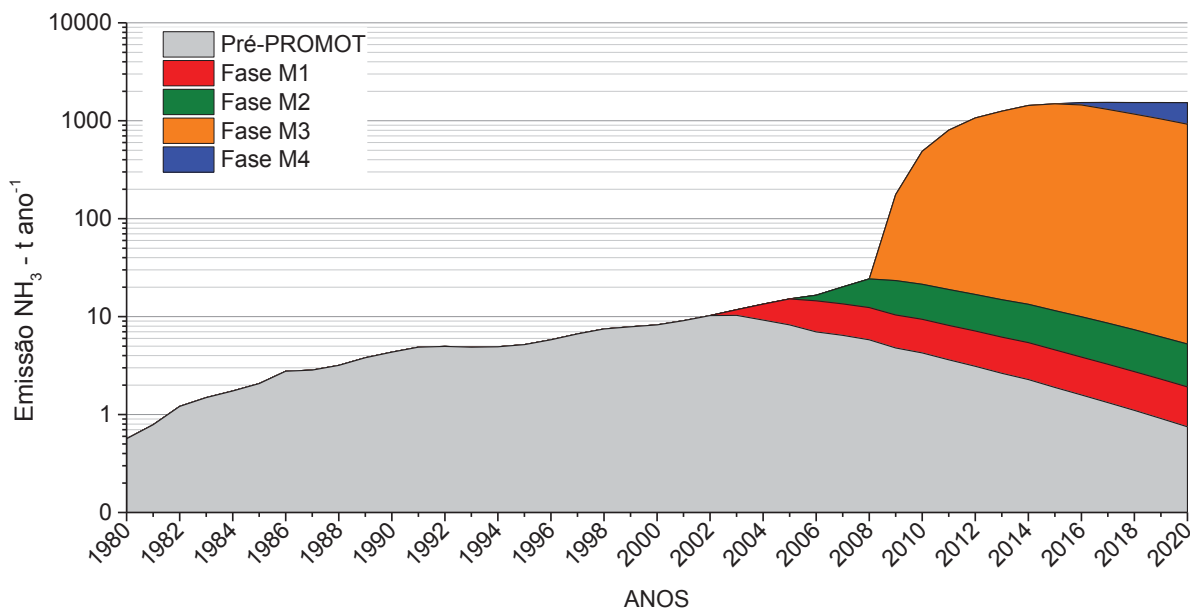
FONTE: O autor (2017).

### 6.1.7 Emissões de Amônia – $\text{NH}_3$

A FIGURA 90 apresenta uma estimativa das emissões de  $\text{NH}_3$  usando os fatores de emissão propostos e premissas adotadas nas projeções anteriores. Observa-se na figura, em escala logarítmica, que as emissões do composto mudam de patamar após 2009, ano de início da fase M3 caracterizada pelo uso de conversores catalíticos. As emissões para o ano de 2008 somavam aproximadamente  $24,2 \pm 4,8 \text{ t ano}^{-1}$  passando, no ano de 2009, a  $176,3 \pm 34,8 \text{ t ano}^{-1}$  com os veículos da fase M3 responsáveis por 87% dessa emissão. O valor máximo estimado de emissão para esse composto é atingido no ano de 2017 ( $1.540 \pm 304 \text{ t ano}^{-1}$ ). O total dessas emissões contempla as emissões da frota *flex fuel* com a combinação de uso de etanol e gasolina conforme premissas adotadas.

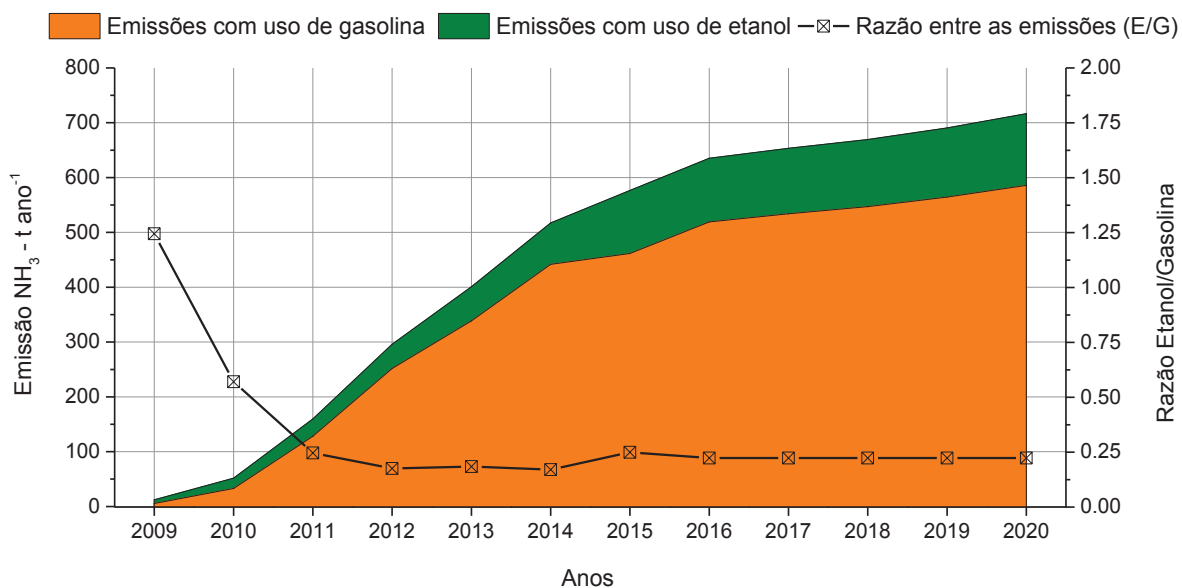
Na FIGURA 91 podemos observar o detalhamento das emissões de amônia da frota *flex fuel* com uso de etanol e gasolina. Observa-se, com exceção do primeiro ano, que as emissões dos motocicletas abastecidos com etanol são responsáveis pela maior parte das emissões, ficando a razão entre as emissões etanol/gasolina em aproximadamente 0,25 após o ano de 2010. A menor emissão com etanol está ligada à menor emissão do composto com o uso desse combustível, fator de emissão 48% menor, e atribuição a uma menor parcela da frota utilizando esse combustível.

FIGURA 90 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE AMÔNIA ENTRE 1980 E 2020 PARA MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 91 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE AMÔNIA NA FROTA *FLEX FUEL*



FONTE: O autor (2017).

A emissão de amônia não é abordada pelos inventários nacionais, devido à falta de fatores de emissões que contemplem esse composto da frota circulante com as condições locais.

### 6.1.8 Emissões de Óxido Nitroso – N<sub>2</sub>O

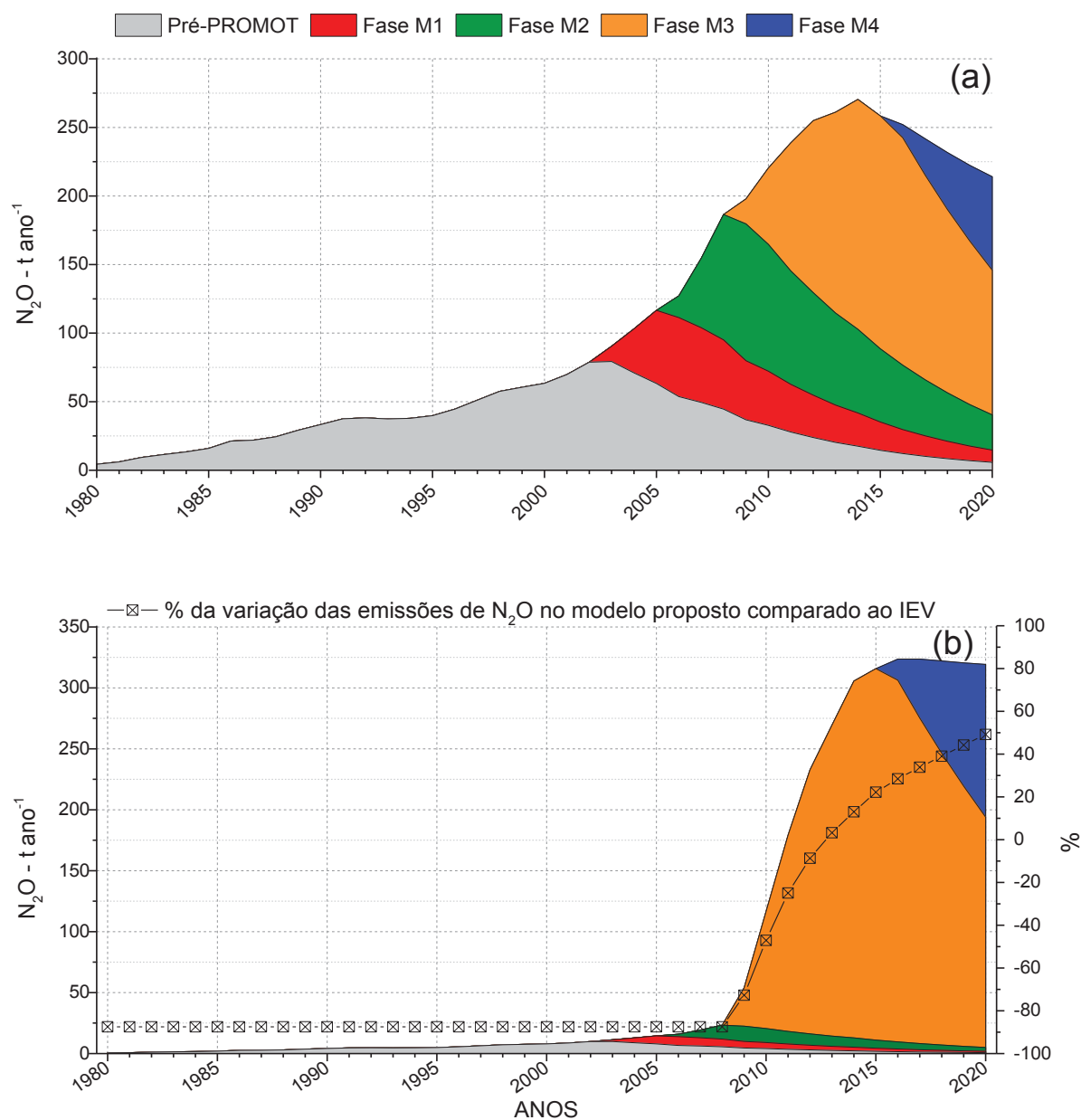
Utilizando os preceitos já citados efetuaram-se projeções das emissões de N<sub>2</sub>O para os fatores de emissões do IEV e estimados nesta pesquisa. A FIGURA 92 (a) apresenta as emissões entre 1980 e 2020 com uso dos fatores de emissão do IEV. Observa-se um aumento contínuo das emissões até o ano de 2015, quando as emissões atingem 289 toneladas e depois uma contínua redução, atingindo 246 toneladas no ano de 2020. Nota-se que essa redução se deve à projeção adotada para as vendas de novos veículos entre os anos de 2017 e 2020, pois como os fatores de emissões do IEV são fixos e iguais para todas as fases, a redução das emissões está correlacionada com a entrada de novos veículos, a taxa de sucateamento da frota usada e a redução de estimativa de acúmulo de rodagem nos veículos mais antigos. Observa-se, ainda, que o IEV não apresenta um fator de emissão de N<sub>2</sub>O para os motocicletos *flex fuel* com o uso de etanol combustível.

Na FIGURA 92 (b) apresentam-se as estimativas de emissões com uso dos fatores propostos. Observa-se que, até o ano de 2008, as emissões são reduzidas quando comparadas ao modelo do IEV, totalizando, nesse ano,  $23 \pm 4 \text{ t ano}^{-1}$  – valor cerca de oito vezes menor que o projetado pelo IEV (186 toneladas). A partir do ano de 2009, como notado para as emissões de NH<sub>3</sub>, observa-se um incremento das emissões no modelo proposto devido à entrada no mercado de motocicletas providos de catalisadores da fase M3. As emissões do modelo proposto superam as projeções do IEV no ano de 2014,  $306 \pm 55 \text{ t ano}^{-1}$  e  $270 \text{ t ano}^{-1}$ , respectivamente, para o modelo da Tese e IEV. Para o ano de 2020 as emissões no modelo proposto são de  $319 \pm 57 \text{ t ano}^{-1}$  e para o IEV, de 214 toneladas.

Uma importante característica do N<sub>2</sub>O é sua estabilidade química, tendo assim um elevado tempo de permanência na atmosfera, em torno de 160 anos (LASHOF; AHUJA, 1990). Na FIGURA 93 se observa a emissão acumulativa para o N<sub>2</sub>O até o ano de 2020. As diferenças entre os modelos ficam claras: até o ano de 2008 as emissões com o uso dos fatores propostos são em torno de oito vezes menores, quando comparadas ao IEV. Nesse período, que compreendeu as fases PP, M1 e M2, os motocicletas não possuíam catalisadores, sistema de pós-tratamento que propicia o aumento das emissões do composto. Após 2009, ano em que se iniciou a fase M3, caracterizada pelo uso de catalisadores, a emissão no modelo proposto tem um incremento acentuado. Ao final de 2020 as estimativas de

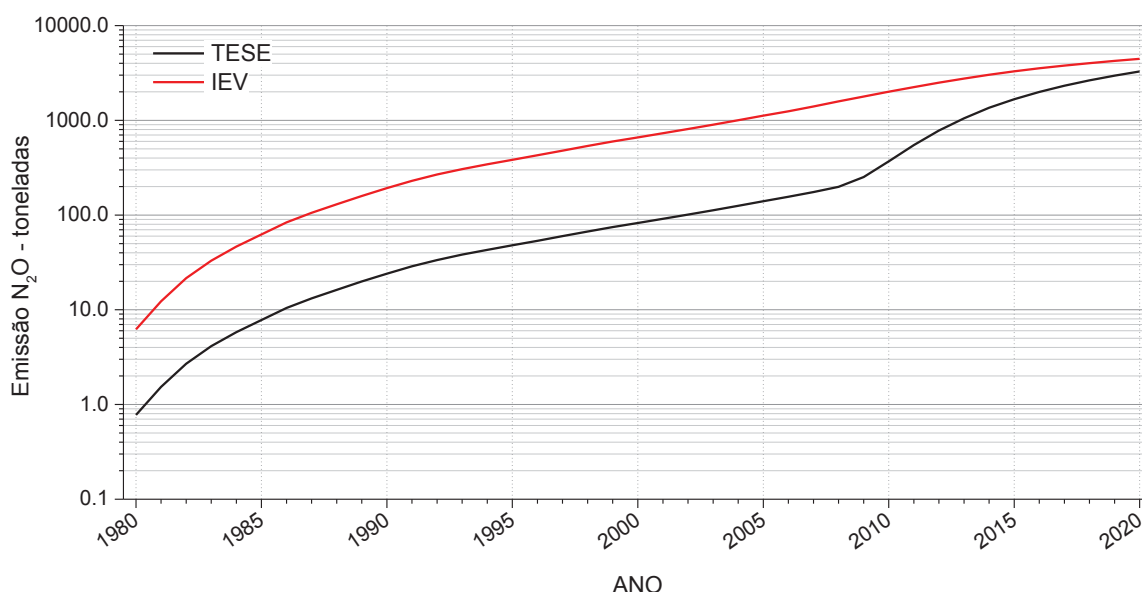
emissões acumuladas somam  $3281 \pm 588$  toneladas e 4451 toneladas, respectivamente, para o modelo da Tese e IEV.

FIGURA 92 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE  $N_2O$  ENTRE 1980 E 2020 UTILIZANDO FATORES DE EMISSÃO DO IEV



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 93 – EMISSÕES ACUMULADAS DE N<sub>2</sub>O ATÉ 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV E TESE



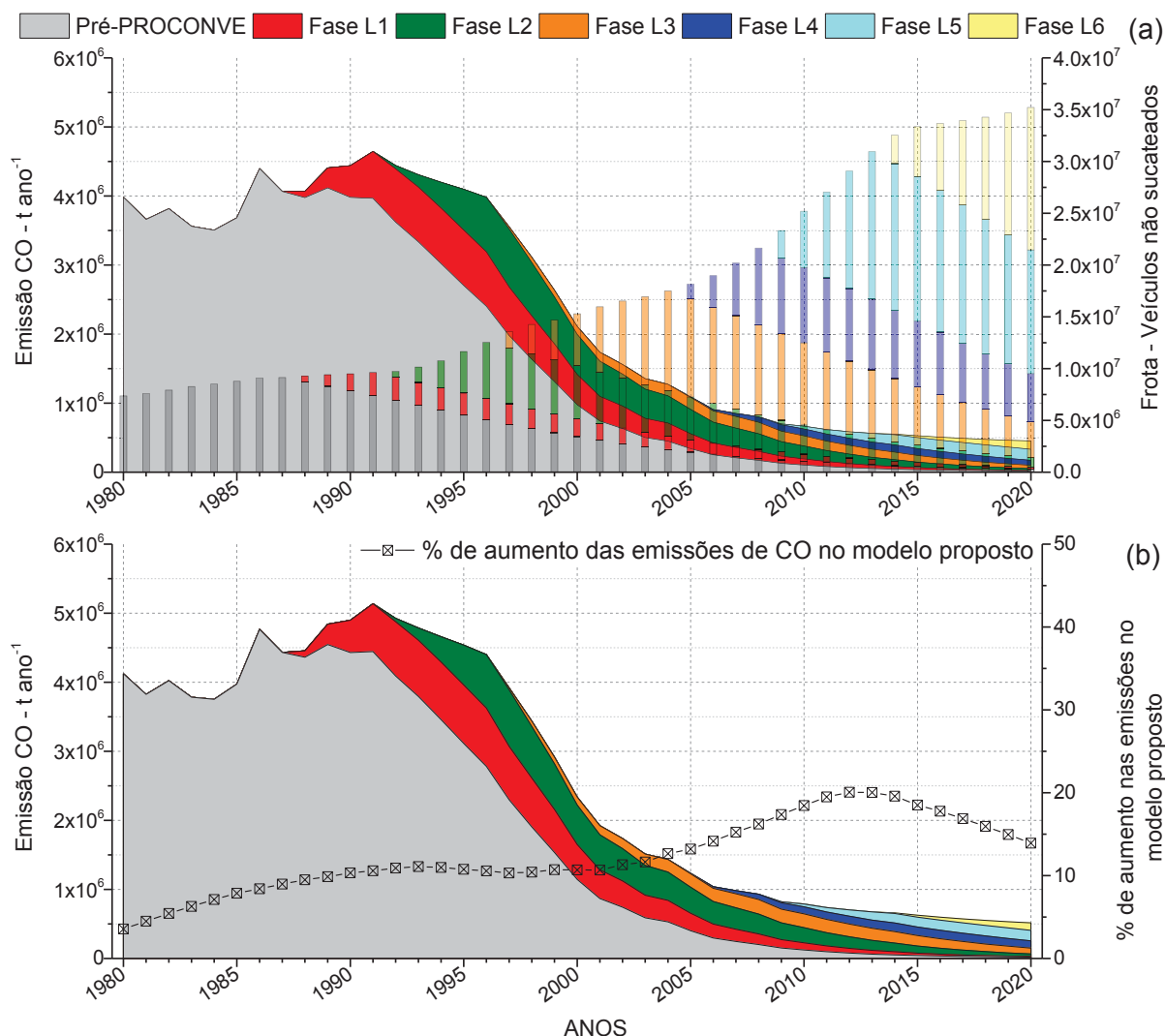
FONTE: O autor (2017).

## 6.2 RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS

### 6.2.1 Emissões de Monóxido de Carbono

Na FIGURA 94 observam-se as emissões de CO por fases do PROCONVE para o modelo do IEV (a) e tese (b), seguindo as premissas já apresentadas para os motocicletas. Ainda, é possível observar na FIGURA 94 (a), no gráfico de barras, o tamanho da frota de veículos leves de passageiros e sua composição pelas fases da legislação. Os benefícios do programa de controle das emissões são demonstrados nos dois modelos, com a redução acentuada das emissões e o crescimento da frota. As emissões no modelo proposto são superiores às do IEV em todo o período simulado. Observa-se, na FIGURA 94 (b), a porcentagem de aumento das emissões de CO no modelo proposto em relação ao IEV, sendo a maior diferença em torno de 20% no ano de 2012. Após esse período as diferenças iniciam uma redução, fato explicado pelo aumento da participação da fase L5 e entrada na frota de veículos da fase L6, ambas com fatores de emissão propostos menores que os apresentados pelo IEV.

FIGURA 94 – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B)



FONTE: O autor (2017).

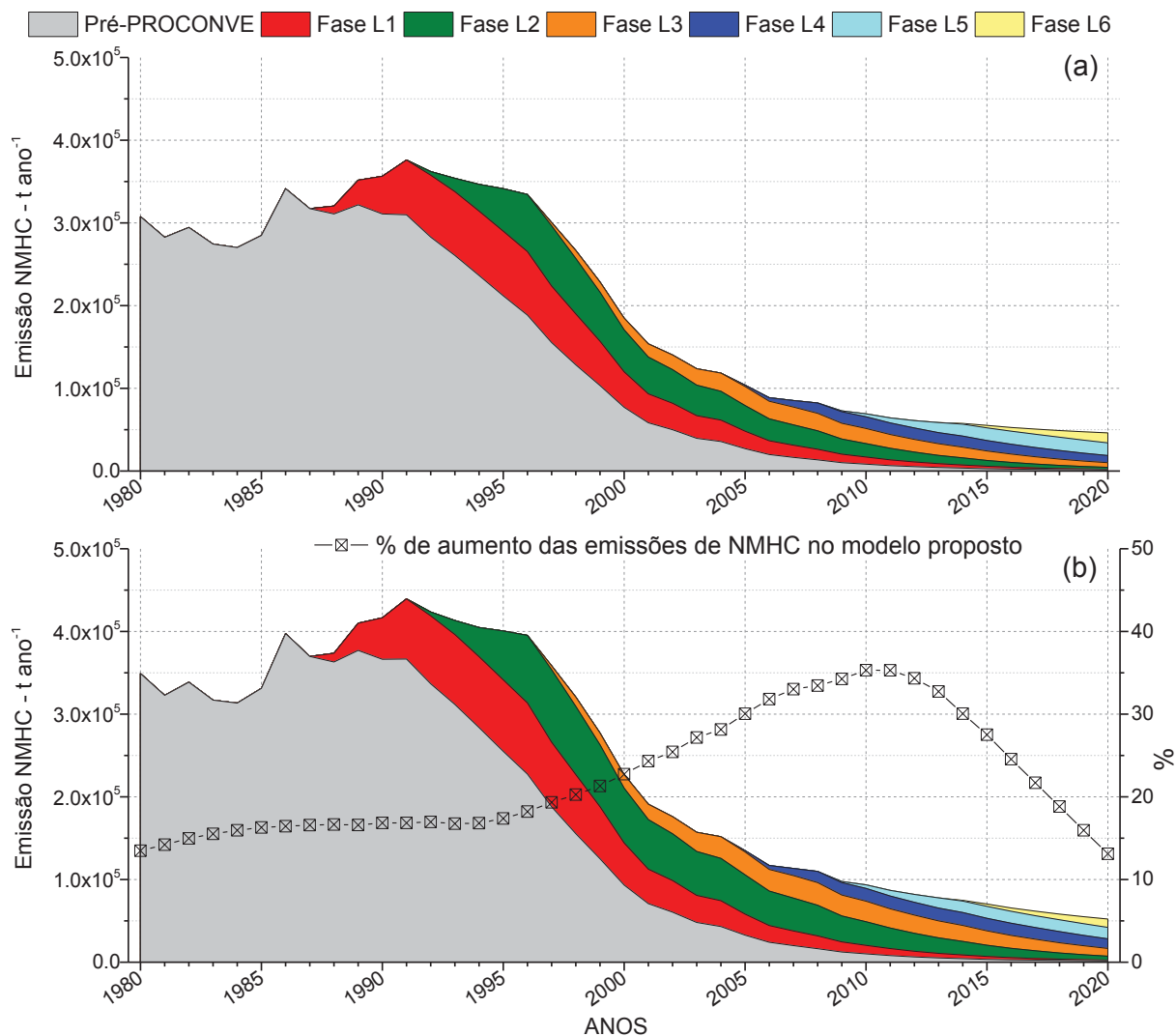
NOTA: Na figura (a) as barras representam a composição da frota de acordo com as fases do PROCONVE; Na figura (b) está apresentada a variação em % do modelo proposto em comparação com o IEV.

### 6.2.2 Emissões de NMHC e CH<sub>4</sub>

Na FIGURA 95 são apresentados cenários para as emissões de NMHC nos modelos do IEV (a) e tese (b). Observa-se que as emissões no modelo proposto são superiores em todos os anos simulados. As projeções para as emissões de NMHC do IEV seguem, para as fases PP, L1 e L2, a mesma razão entre as emissões de NMHC/THC (0,85) apresentada anteriormente para os motocicletos. O maior aumento

das emissões, em porcentagem, ocorre para os anos de 2010 e 2011, em torno de 35%.

FIGURA 95 – EMISSÕES DE NMHC ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



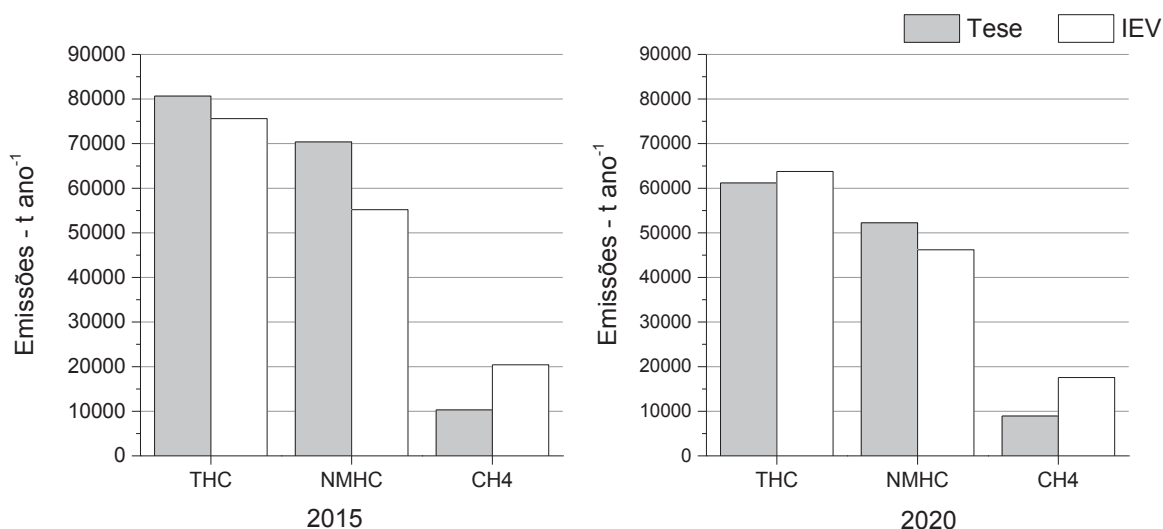
FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 96 são apresentadas as emissões para os anos de 2015 e 2020 de THC, NMHC e CH<sub>4</sub>. Devido às diferenças de relação adotadas pelo modelo proposto, em comparação ao IEV, as emissões de metano são inferiores nas projeções desta pesquisa. Ainda, observa-se que, para o ano de 2020, as emissões de THC no modelo proposto são inferiores às estimadas pelo IEV, fato associado à maior participação das fases L5 e L6 na frota de veículos, sendo que os fatores propostos nesta pesquisa são inferiores aos adotados pelo IEV. Quanto às emissões



de NMHC, mesmo com menor emissão de THC pelo modelo proposto, as emissões são superiores ao modelo do IEV devido às diferenças citadas.

FIGURA 96 – EMISSÕES DE THC, NMHC E CH<sub>4</sub> PARA 2015 E 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV E TESE



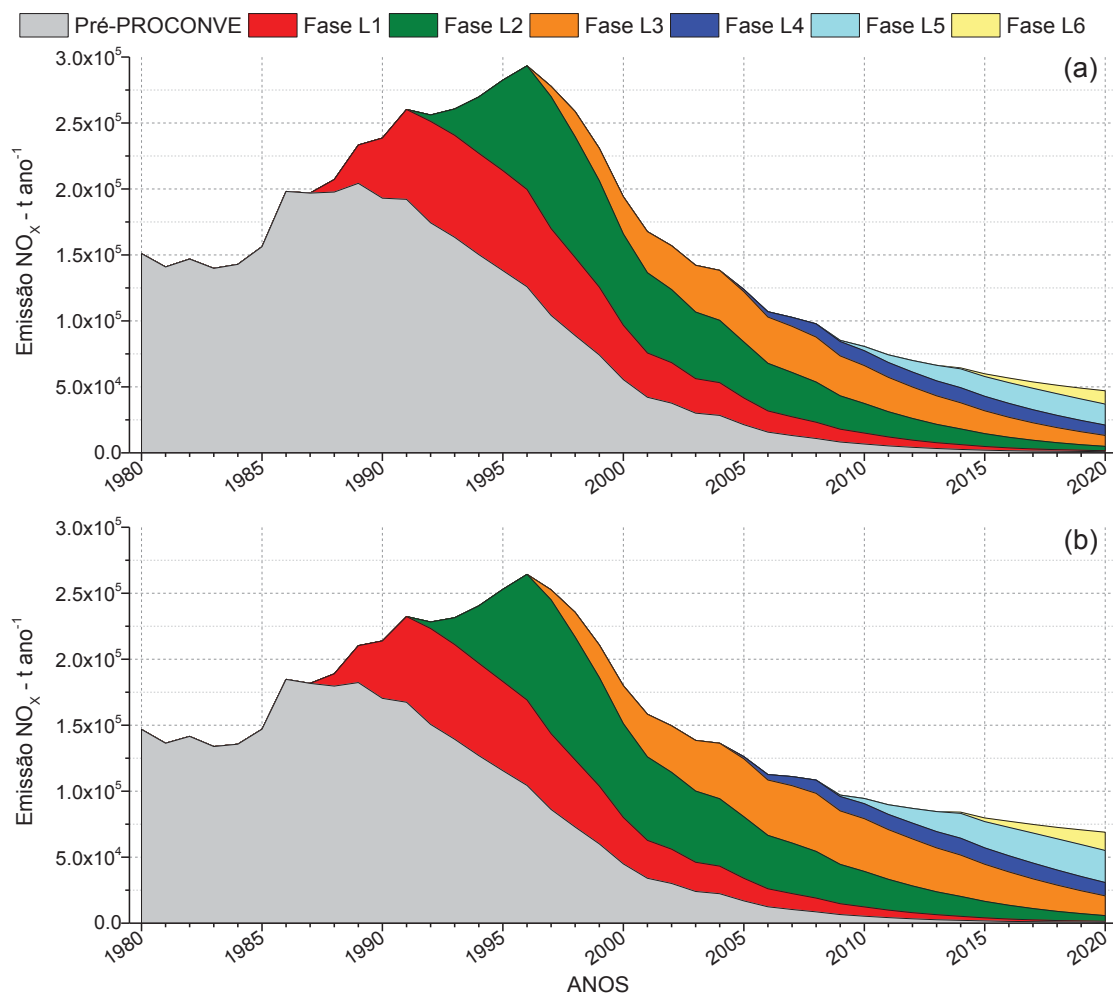
FONTE: O autor (2017).

### 6.2.3 Emissões de NO<sub>x</sub>

As emissões de NO<sub>x</sub>, conforme FIGURA 97, são inferiores no modelo proposto até o ano de 2005, devido à redução dos fatores de emissão proposta para as fases PP e L1. Após 2005 ocorre um aumento gradativo nas projeções da tese, e em 2020 estima-se uma emissão de 68.970 toneladas. O modelo do IEV apresenta uma projeção de 47.025 toneladas para o mesmo ano.

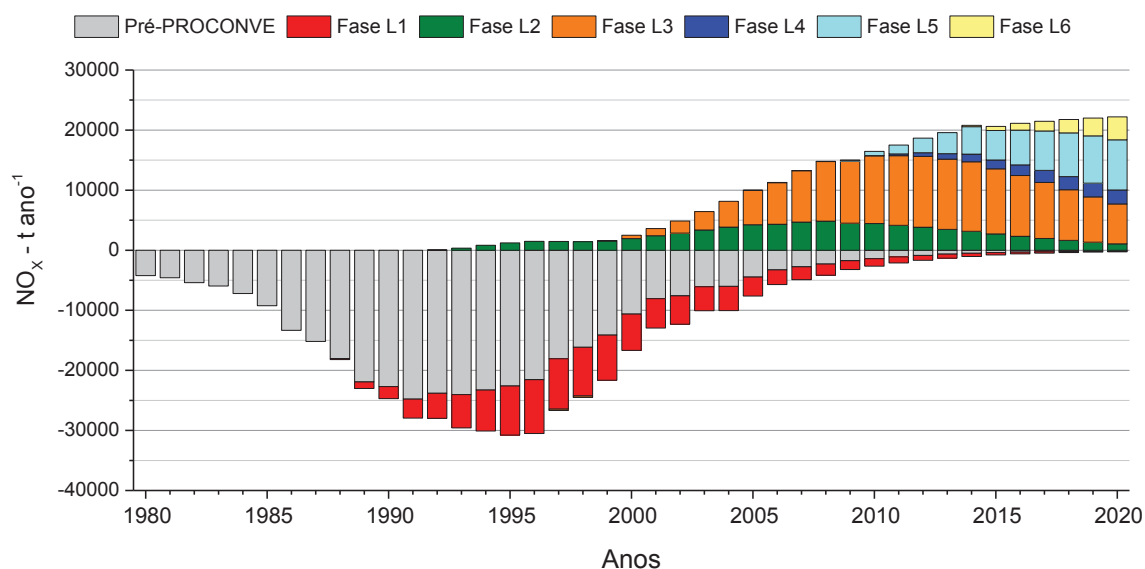
Na FIGURA 98 observa-se a diferença entre os dois modelos durante o período simulado, a referência sendo o modelo proposto. Nota-se a participação das fases PP e L1, na redução das emissões, quando comparado o modelo proposto ao IEV. Para as demais fases, observa-se um aumento das emissões quando comparados os resultados. A fase com maior contribuição no aumento das emissões no período simulado foi a L3.

FIGURA 97 – EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 98 – DIFERENÇAS ENTRE O MODELO PROPOSTO E O IEV – PERÍODO 1980 A 2020

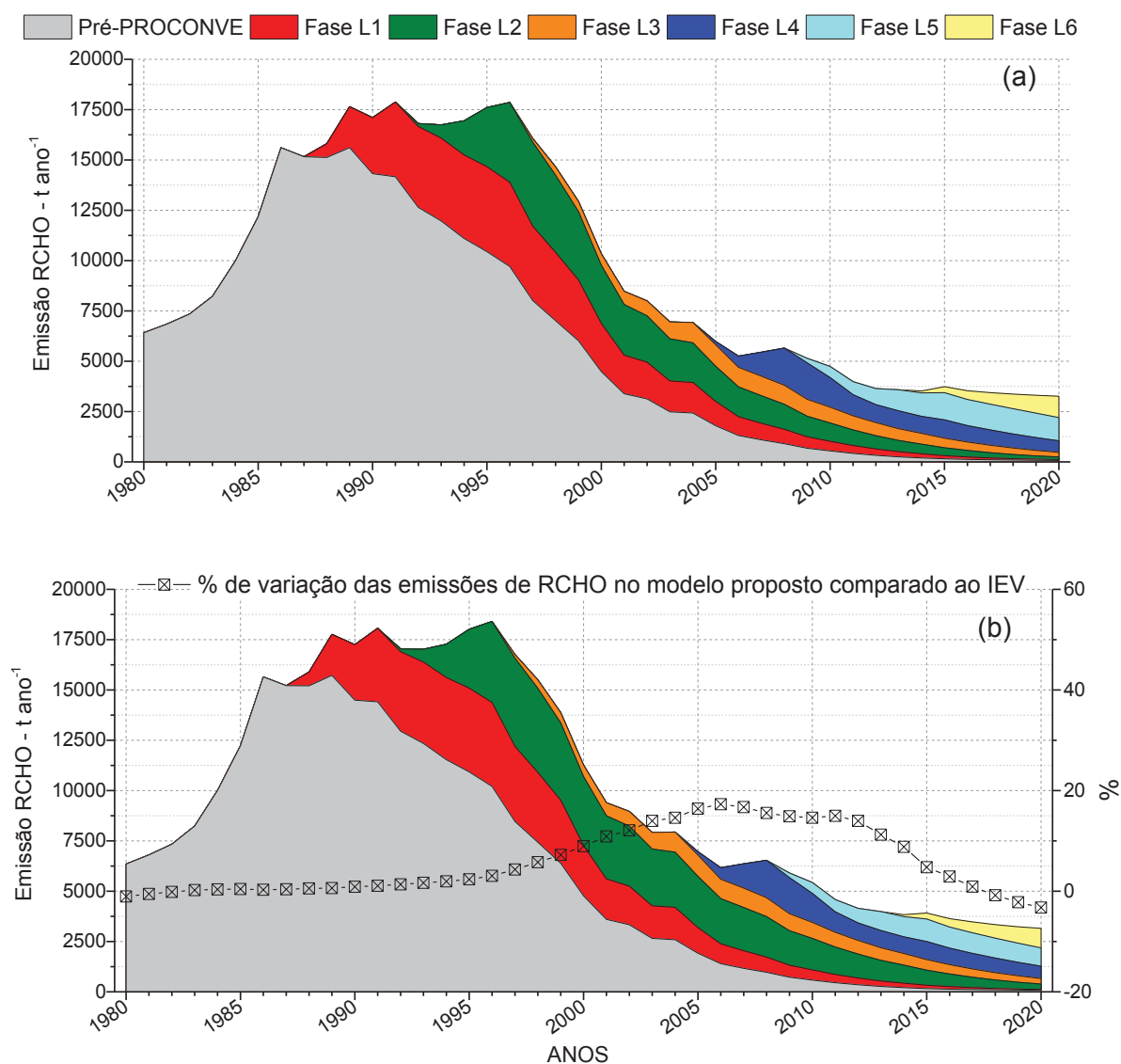


FONTE: O autor (2017).

#### 6.2.4 Emissões de Aldeídos

Conforme FIGURA 99 (a), as emissões de aldeídos apresentam um perfil de estabilização no modelo do IEV entre os anos de 2012 a 2020. Já, para o modelo proposto (b), ocorre uma redução contínua das emissões até 2020. As emissões no modelo proposto se tornam mais expressivas, superiores em mais de 10% que as estimadas pelo IEV, após o ano de 2001. Os níveis de diferenças entre os dois modelos se mantêm acima desse valor até o ano de 2013, quando ocorre uma redução nas projeções do modelo proposto devido maior participação da frota L5 e L6, que apresentaram menores fatores de emissão para os aldeídos.

FIGURA 99 – EMISSÕES DE ALDEÍDOS DE 1980 A 2020 COM FATORES DO IEV (A) E TESE (B) PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS

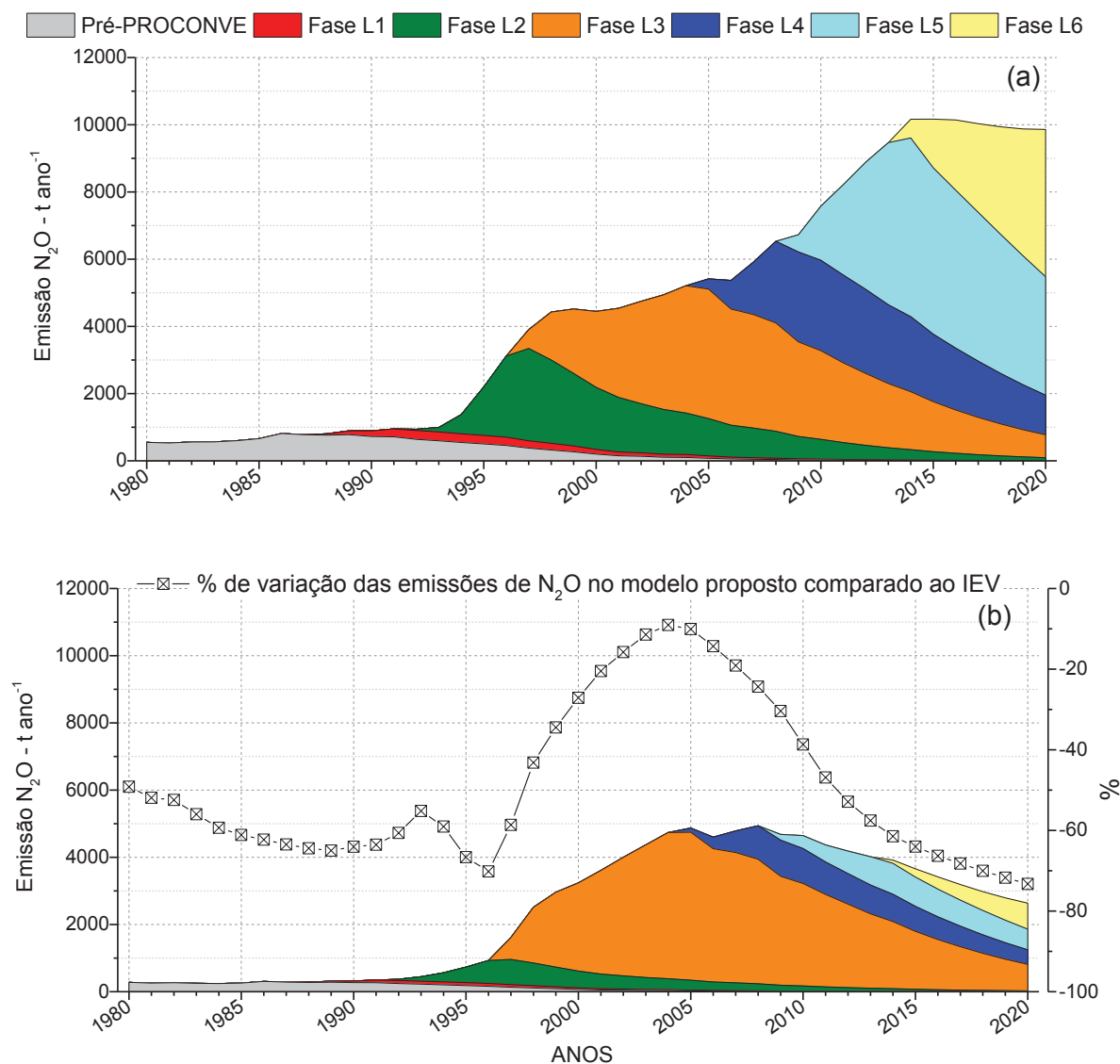


FONTE: O autor (2017).

### 6.2.5 Emissões de N<sub>2</sub>O

Na FIGURA 100 apresentam-se as emissões de N<sub>2</sub>O para os modelos do IEV (a) e tese (b). Observa-se um aumento das emissões no modelo proposto no início da vigência da fase L3, para as demais fases o modelo do IEV projeta maiores emissões. Para o ano de 2015 as projeções do IEV apresentam uma emissão de 10.168 toneladas e o modelo proposto, de 3.660 toneladas.

FIGURA 100 – EMISSÕES DE  $N_2O$  DE 1980 A 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV (A) E TESE (B) PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



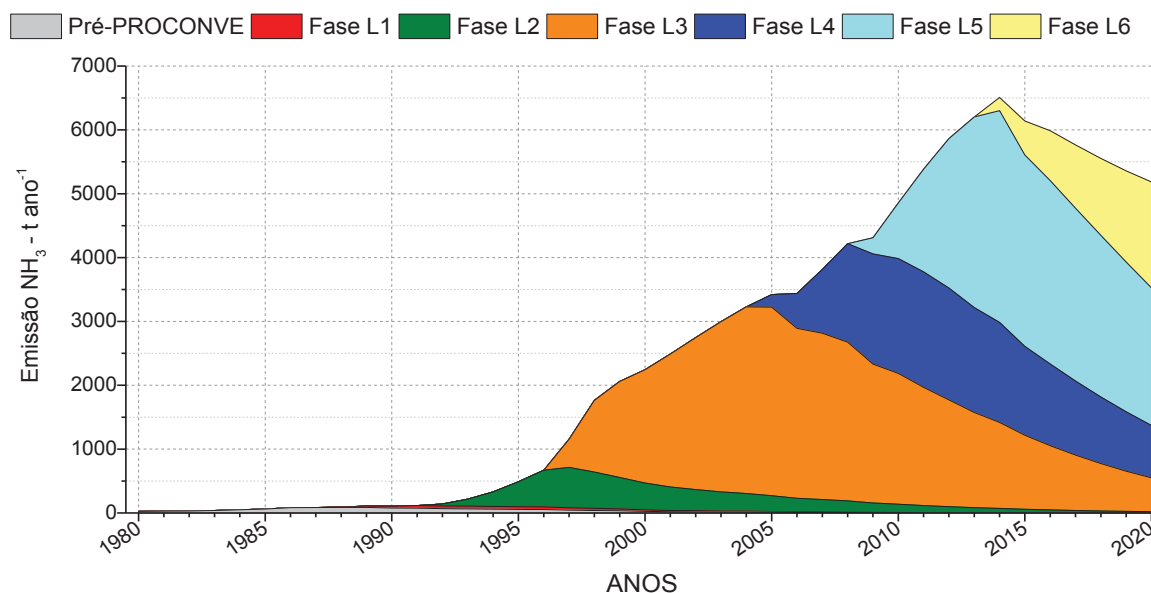
FONTE: O autor (2017).

## 6.2.6 Emissões de Amônia

Conforme FIGURA 101, a emissão de amônia torna-se mais expressiva após o ano de 1992, período do início da vigência da fase L2 na frota, estágio de controle em que se iniciou o uso de catalisadores. Como observado para as emissões de  $N_2O$ , a frota da fase L3 é responsável pela maior emissão de  $NH_3$ , composto não regulamentado pela legislação. Do mesmo modo que foi citado para os motocicletas,

para os veículos leves de passageiros os inventários nacionais não apresentam uma estimativa das emissões de amônia.

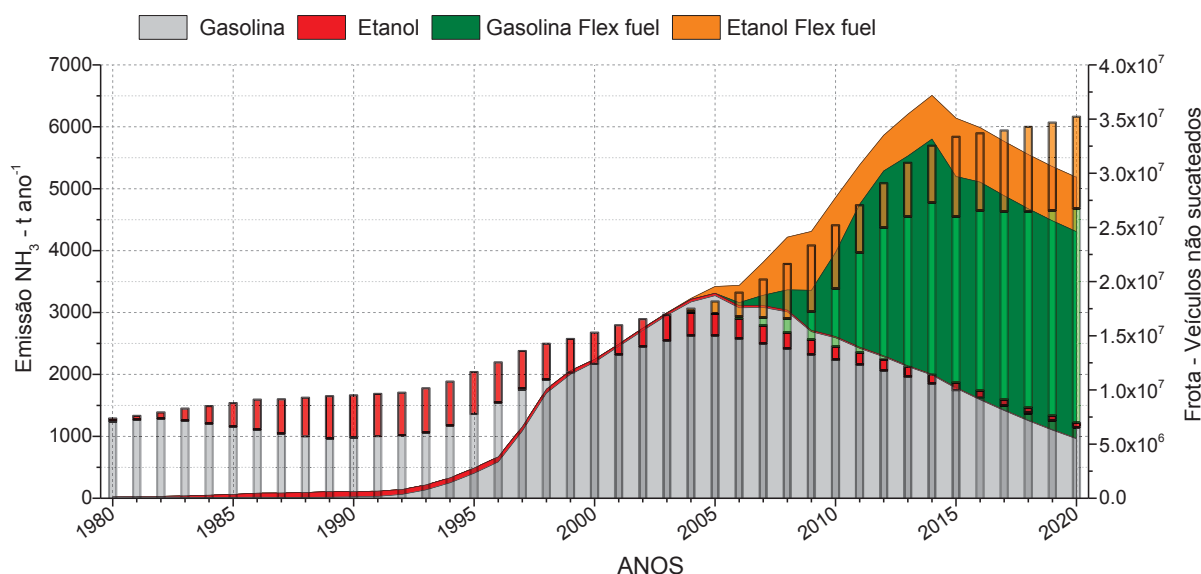
FIGURA 101 – EMISSÕES DE  $\text{NH}_3$  ENTRE 1980 E 2020 COM FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 102 observam-se as emissões de amônia de acordo com os combustíveis utilizados pela frota e detalhes da composição da frota de veículos leves de passageiros, sendo que a maior parcela das emissões foi atribuída ao uso de gasolina, devido ao fato de os maiores fatores de emissão serem com uso desse combustível e a maior parcela da frota utilizar gasolina nas simulações.

FIGURA 102 – EMISSÕES DE  $\text{NH}_3$  ENTRE 1980 E 2020 DE ACORDO COM COMBUSTÍVEIS USADOS E TIPO DA FROTA



FONTE: O autor (2017).

### 6.3 RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS

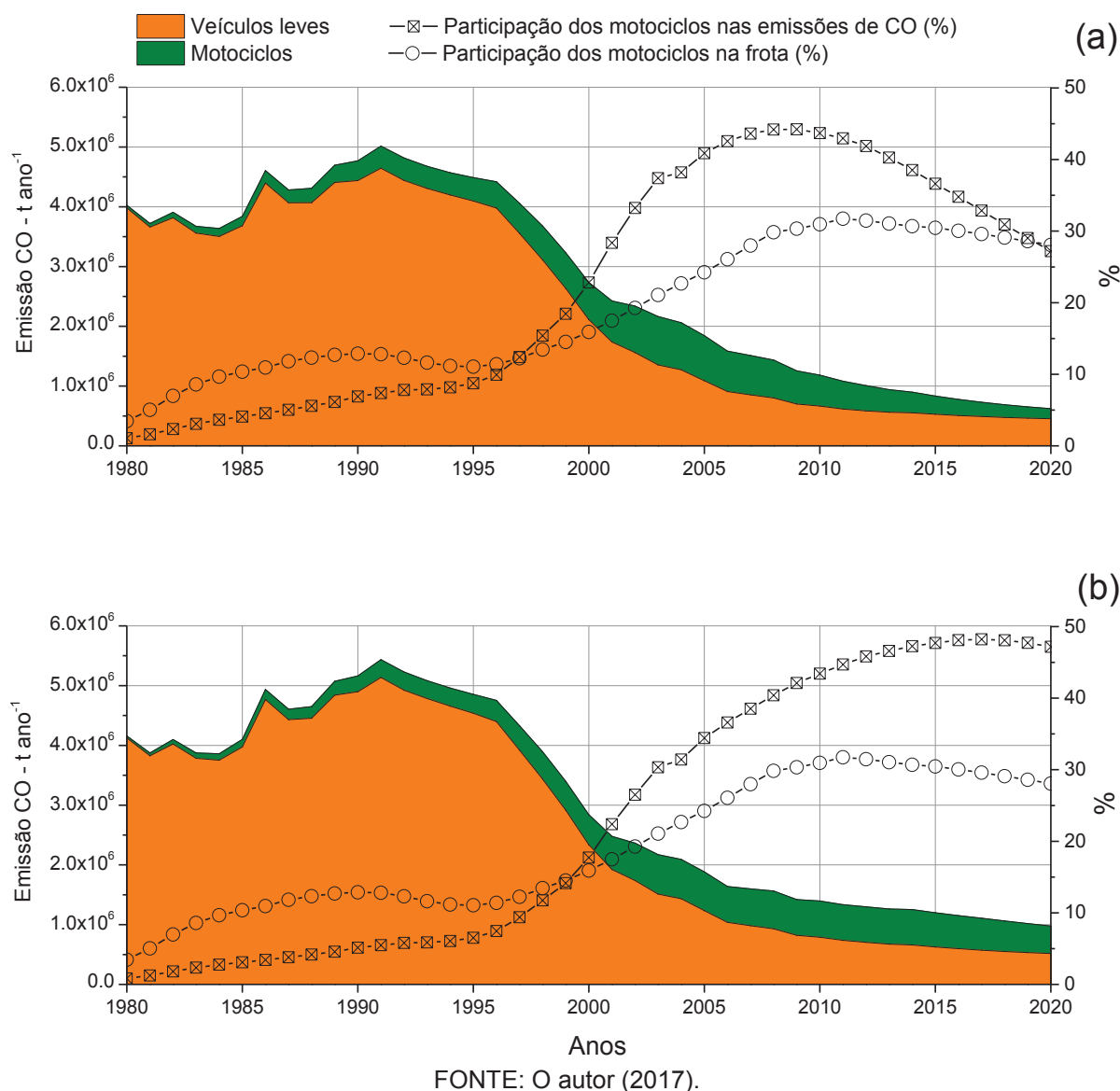
Nessa seção apresentam-se os resultados combinados das emissões em motocicletas e veículos leves de passageiros, efetuando-se comparações com os resultados provenientes do uso dos fatores de emissões do IEV. Comparam-se, ainda, os resultados das emissões dos motocicletas e veículos leves de passageiros de acordo com relevância e proporção.

#### 6.3.1 Emissões de Monóxido de Carbono

Na FIGURA 103 apresentam-se as emissões de CO combinados dos veículos leves de passageiros e motocicletas. Observa-se o aumento das emissões para o modelo proposto e uma mudança no perfil da relação entre a frota de motocicletas e suas emissões quando comparadas aos veículos leves. Nos dois modelos a participação das emissões de CO é crescente para os motocicletas após 1995, porém no modelo do IEV, FIGURA 103 (a) a tendência muda após o ano de 2009, quando a porcentagem das emissões referente aos motocicletas se reduz. No modelo proposto, FIGURA 103 (b) a participação das emissões dos motocicletas é crescente até o ano de 2017, com valores próximos a 50% do total das emissões

estimadas, estando a participação da frota de motocicletas em torno de 30%, tornando relevante a participação dos motocicletas nas emissões desse composto.

FIGURA 103 – EMISSÕES DE CO DE 1980 A 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV (A) E TESE (B) - VEÍCULOS E MOTOCICLOS



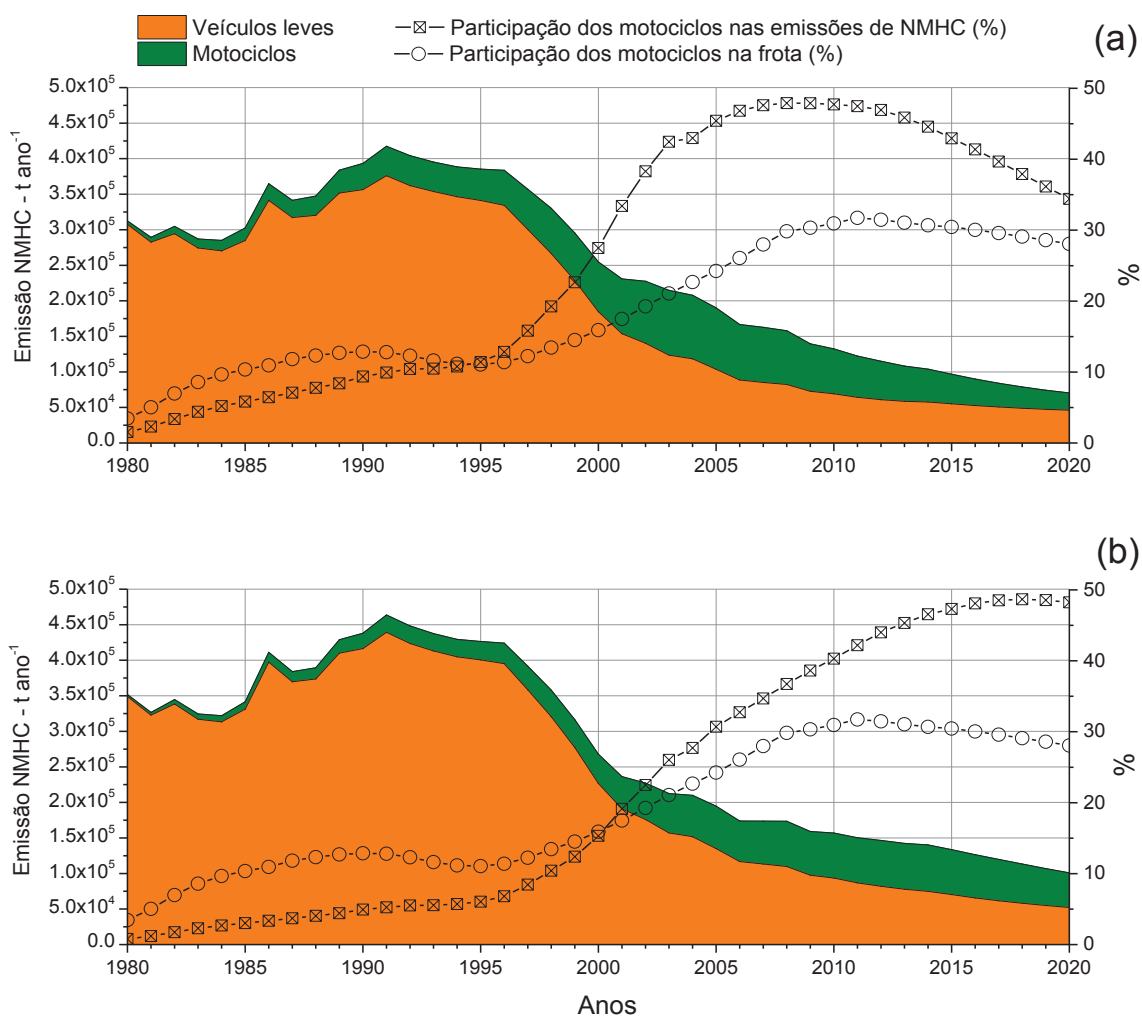
### 6.3.2 Emissões de Hidrocarbonetos

Na FIGURA 104 observa-se nas emissões de NMHC um comportamento semelhante ao do CO, ou seja, a contribuição das emissões dos motocicletas supera a contribuição da frota ao final do período simulado. No modelo do IEV, FIGURA 104 (a), observa-se um maior incremento das emissões dos motocicletas após o ano 2.000, fato relacionado ao aumento da frota de motocicletas e os altos fatores de emissão aliados à redução das emissões nos veículos leves de passageiros. As



emissões do modelo proposto, FIGURA 104 (b) são superiores em todos os anos simulados quando comparadas ao modelo do IEV. Observa-se que as emissões dos motocicletas chegam próximo a uma participação da metade da emissão total, mesmo com sua frota respondendo por aproximadamente 30% do total entre 2015 e 2020.

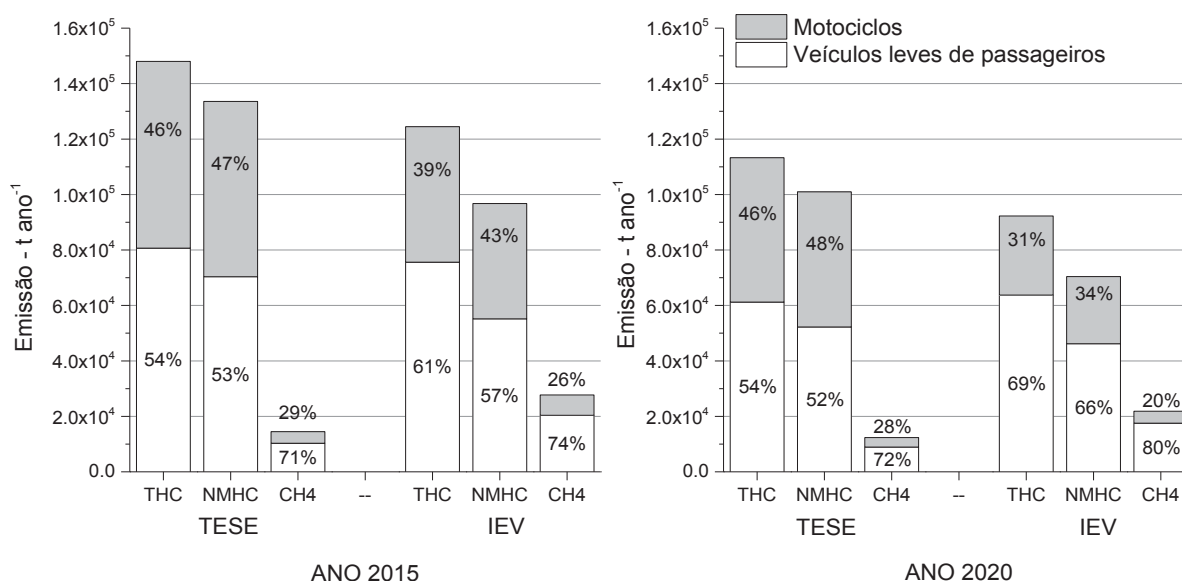
FIGURA 104 – EMISSÕES DE NMHC DE 1980 A 2020 USANDO PROJEÇÕES DO IEV (A) E TESE (B) - VEÍCULOS E MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 105 observam-se as emissões de THC, NMHC e CH<sub>4</sub> para os anos de 2015 e 2020 e as proporções entre as emissões dos veículos leves e motocicletas. As emissões de metano no modelo proposto são inferiores às projetadas pelo IEV devido às diferentes proporções adotadas entre os poluentes.

FIGURA 105 – EMISSÕES THC, NMHC E CH<sub>4</sub> EM 2015 E 2020 COM PROJEÇÕES DO IEV E TESE - VEÍCULOS E MOTOCICLOS

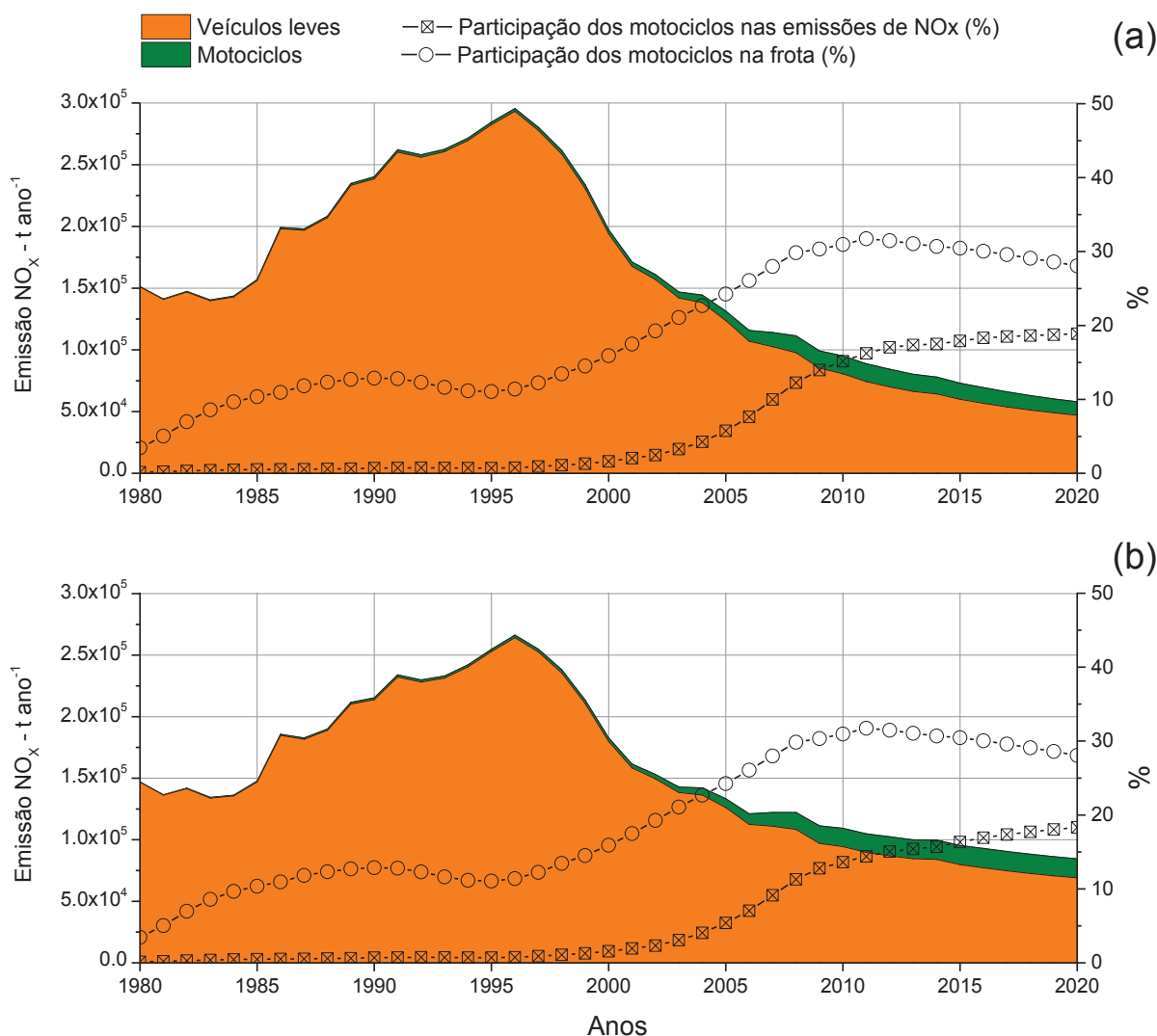


FONTE: O autor (2017).

### 6.3.3 Emissões de NO<sub>x</sub>

As estimativas de emissões de NO<sub>x</sub> pelo modelo do IEV estão apresentadas na FIGURA 106 (a), sendo superiores às do modelo proposto até o ano de 2005. Após esse ano, as emissões do modelo proposto (b) são maiores e apresentam uma taxa de redução menor ao longo dos anos, quando comparadas ao modelo do IEV, fato relacionado a serem os fatores de emissões estimados por esta pesquisa superiores para as fases L5 e L6. De forma geral, mesmo com mudanças nos níveis de emissões entre os dois modelos, a participação dos motociclos nas emissões se mantém proporcional.

FIGURA 106 – EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> DE 1980 A 2020 COM PROJEÇÕES DO IEV E TESE - VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS



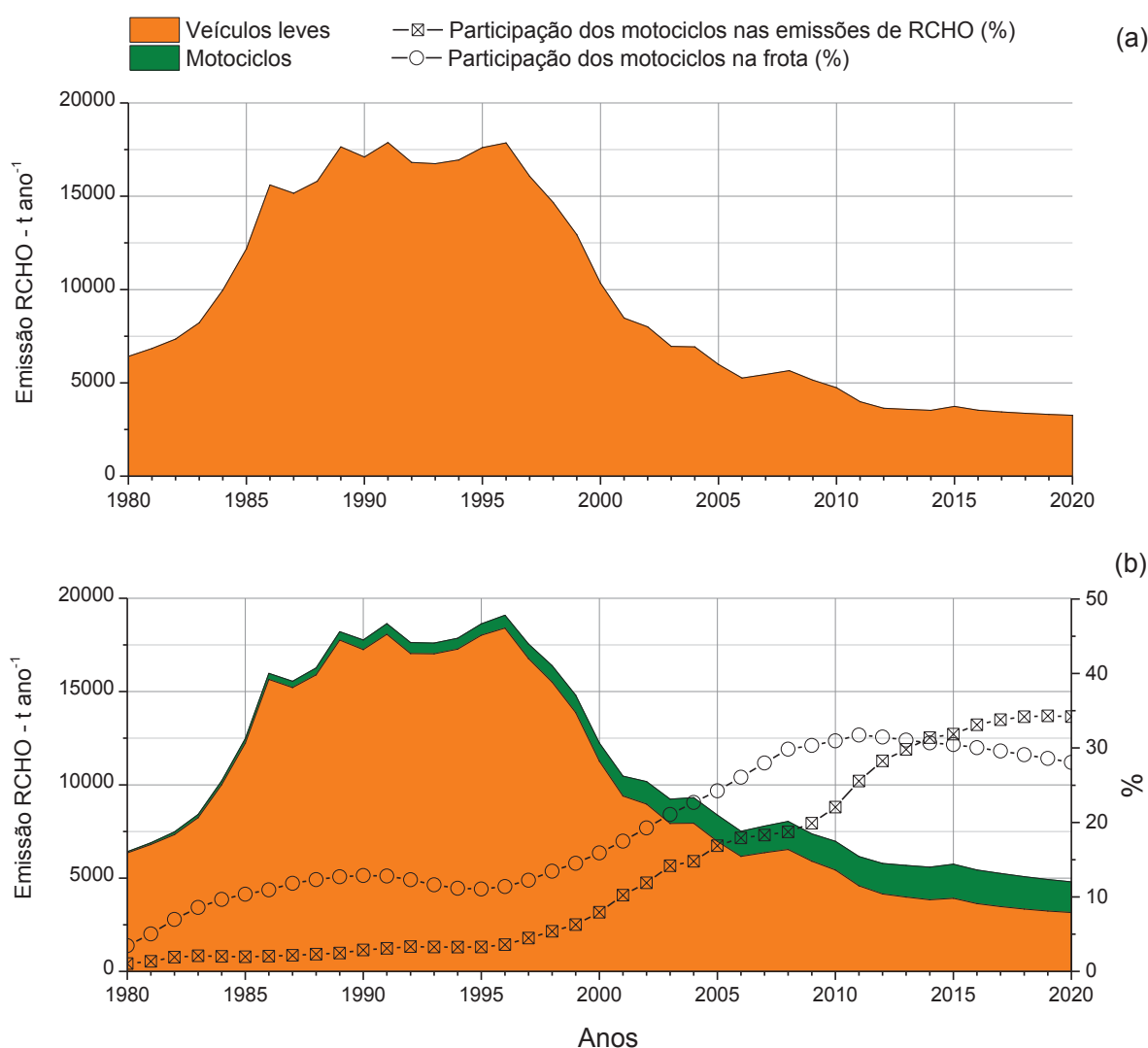
FONTE: O autor (2017).

### 6.3.4 Emissões de Aldeídos

Na FIGURA 107 apresentam-se as projeções das emissões de aldeídos para os modelos em discussão. As estimativas do IEV, FIGURA 107 (a), não consideram as emissões de aldeídos por motociclos. No modelo proposto (b) estão apresentadas as emissões de aldeídos nos veículos leves de passageiros e para os motociclos. Após o ano de 2009 as estimativas propostas apresentam um valor médio de 30% superiores aos estimados pelo IEV.

Referente às emissões dos motocicletas, observa-se na FIGURA 107 (b) que, entre 1980 e 2010, a relação entre a participação das emissões de aldeídos em motocicletas e frota manteve-se similar. Após o ano de 2010 observa-se um crescimento acentuado da participação das emissões de aldeídos dos motocicletas, sendo que após o ano de 2014 a porcentagem nas emissões supera a da frota. Esse cenário pode ser explicado pela entrada no mercado no ano de 2009 dos motocicletas *flex fuel*, que possuem um fator de emissão com uso de etanol superior em aproximadamente seis vezes ao valor apresentado com gasolina. Nesse cenário as emissões de aldeídos assumem relevância, proporcionando um aumento considerável nas emissões. Lembrando que essas emissões não são regulamentadas para os motocicletas.

FIGURA 107 – EMISSÕES DE ALDEÍDOS DE 1980 A 2020 COM PROJEÇÕES DO IEV E TESE - VEÍCULOS E MOTOCICLOS

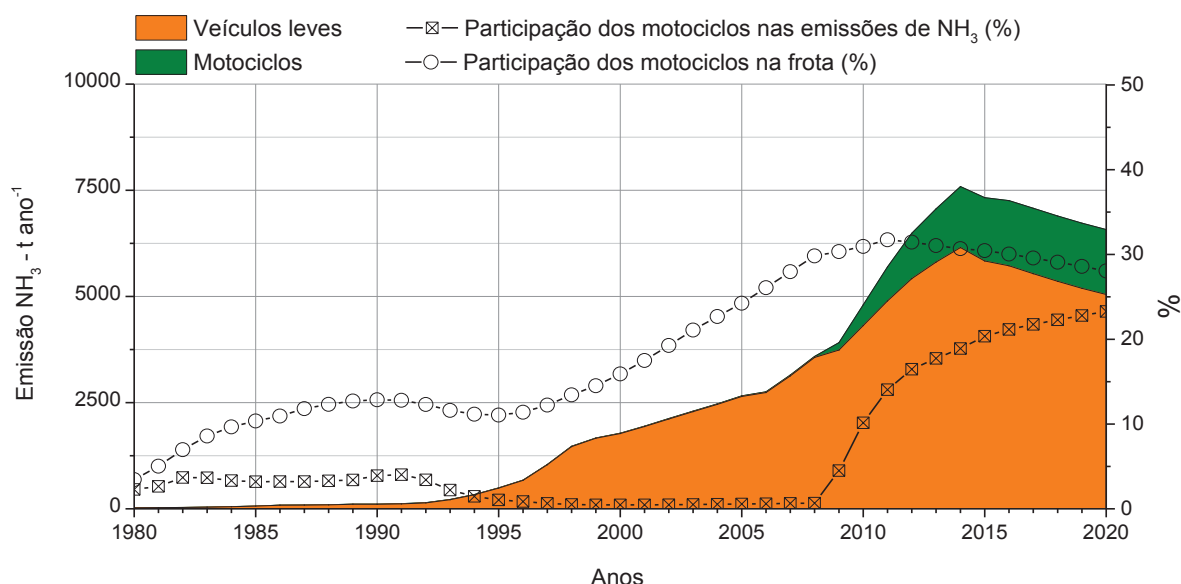


FONTE: O autor (2017).

### 6.3.5 Emissões de Amônia

As emissões de amônia, tanto para veículos leves de passageiros como para motocicletas, apresentam incremento após a entrega em vigor das fases que necessitaram uso de catalisadores para o controle das emissões. Para os veículos leves de passageiros, isso ocorreu após o ano de 1992 e, para os motocicletas, após o ano de 2009. Observa-se na FIGURA 108 uma participação crescente nas emissões de amônia pelos motocicletas mesmo após o ano de 2010, quando a ocorre uma redução na proporção da frota. Esse fato se deve ao sucateamento mais intenso dos motocicletas antigos e entrada de novos, com maior fator de emissão, e a redução do fator de emissão nos veículos leves de passageiros novos (L5 e L6).

FIGURA 108 – EMISSÕES DE NH<sub>3</sub> DE 1980 A 2020 COM FATORES DE EMISSÃO PROPOSTOS PARA VEÍCULOS E MOTOCICLOS



FONTE: O autor (2017).

## 6.4 SÍNTESE DOS CENÁRIOS APRESENTADOS

### 6.4.1 Motociclos

As estimativas de emissões do IEV para o CO, THC e NMHC apresentam em suas estimativas uma participação expressiva da fase Pré-PROMOT, devido aos fatores de emissão elevados que foram arbitrados a esses motocicletas. Esse fato aliado ao uso de fatores constantes aos motocicletas das fases seguintes, que

possuem menores taxa de emissão, impôs ao modelo uma característica de redução constante das emissões devido à renovação da frota.

No modelo proposto observou-se uma menor emissão dos compostos estudados de forma geral até o ano de 2005, invertendo-se essa tendência após esse ano devido à consideração da degradação das emissões com o uso dos veículos. Esse fato está relacionado ao uso de fatores de emissão menores que a fase Pré-PROMOT.

Referente às emissões de metano, devido à relação aplicada pelo IEV, em que o total de hidrocarbonetos é composto por 85% de NMHC e 15% de CH<sub>4</sub>, os resultados apresentaram diferenças significativas entre os modelos. Com isso, as estimativas do modelo proposto reduzem as emissões de CH<sub>4</sub> e aumentam as de NMHC.

Para as emissões de NO<sub>x</sub>, as estimativas do modelo proposto apresentam uma estabilização das emissões após 2015, com uma tendência de redução em 2020, fato relacionado com a estimativa de redução da frota nesse ano. O cenário proposto para 2020 supera o com uso dos fatores do IEV em 40% para esse ano.

As emissões de aldeídos, não consideradas no modelo do IEV, foram estimadas a partir das emissões de THC. Destaca-se a influência da entrada no mercado de veículos *flex fuel* devido ao maior fator de emissão desse composto em veículos abastecidos com etanol.

O fator de N<sub>2</sub>O proposto apresenta ajustes quando comparado ao utilizado pelo IEV que emprega o mesmo fator de emissão para motos com e sem catalisador. Ainda, estimou-se um fator para os motocicletos abastecidos com etanol, projeção não aplicada pelo IEV.

Estimaram-se fatores de emissão para NH<sub>3</sub> com uso de gasolina e etanol. As projeções de emissão para NH<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O demonstraram a influência do uso de catalisadores na formação desses compostos, pois, conforme estimativas, essas emissões se tornaram relevantes após o ano de 2009, ano em que se iniciou o uso dessa tecnologia. Daemme et al. (2013) apresentaram estudo sobre a redução das emissões de NH<sub>3</sub> em motocicletos com uso de um catalisador SCR passivo e nos experimentos atingiu-se uma redução de 44% das emissões de amônia e 38% para o NO<sub>x</sub>, demonstrando a possibilidade do uso da tecnologia, empregada em veículos do ciclo Diesel, em motocicletos.

#### 6.4.2 Veículos Leves de Passageiros

As projeções das emissões de CO e NMHC para o modelo proposto apresentaram um aumento das emissões em todos os anos simulados. Já para o metano, observou-se uma redução aproximada de 50% das emissões quando comparado o modelo proposto com o IEV.

Para as emissões de NO<sub>x</sub> observou-se uma redução no modelo proposto até o ano de 2005, seguida de um crescimento para os próximos períodos estimados, fato relacionado ao aumento do fator proposto para as fases L5 e L6.

As emissões de amônia nessa classe de veículos se mostraram mais significativas para as fases L3, L4 e L5, ocorrendo uma tendência gradual de redução nessas fases. Para fase L6 o fator observado apresenta uma redução de aproximadamente 50%, quando comparado à fase anterior.

Os fatores de emissão propostos para o N<sub>2</sub>O apresentaram uma redução significativa nas emissões comparadas ao modelo do IEV. A menor diferença foi para o ano de 2004, em torno de 10%, período com maior influência da fase L3 nas emissões. Já, para os anos seguintes, essa diferença aumentou continuamente, chegando a 75% para o ano de 2020.

#### 6.4.3 Cenários da Frota de Veículos Leves de Passageiros e Motociclos

Nas cenarizações envolvendo as frotas de motociclos e veículos leves de passageiros, observou-se, para muitos casos, uma participação mais expressiva dos motociclos nas emissões estimadas. Nesses casos, como, por exemplo, para as emissões de NMHC e aldeídos, a porcentagem referente às emissões dos motociclos supera sua participação na frota avaliada, demonstrando a importância dessa classe de veículo para as emissões de áreas urbanas.

Nos cenários obtidos com o modelo proposto observou-se, para as emissões de NMHC, aldeídos e NO<sub>x</sub>, baixas estimativas de redução entre os anos 2015 a 2020. Esses compostos são os principais precursores da formação do ozônio troposférico, sendo esse um dos principais problemas da poluição atmosférica urbana (ALVIM et al., 2011; NETTO et al., 2017).

Os fatores de emissão para amônia permitem estimar a emissão anual desse composto pelas frotas de veículos leves de passageiros e motociclos. A concentração de amônia nos grandes centros urbanos pode ser atribuída

majoritariamente à frota veicular (BORSARI, 2015), sendo que esse composto causa irritação e danos ao trato respiratório. Ainda, participa de reações secundárias na atmosfera gerando material particulado ultrafino ( $PM_{2,5}$ ), poluente correlacionado com doenças respiratórias e cardiovasculares (SUTTON et al., 2000; POPE III; BURNETT; THURSTON, 2002; LIVINGSTON, 2008). O fator de emissão médio estimado desse composto para os motocicletos das fases M3 e M4 foi de 16,06 mg  $km^{-1}$ , valor inferior apenas aos veículos leves de passageiros da fase L3 (17,3 mg  $km^{-1}$ ). A maior emissão de amônia nos motocicletos pode ser correlacionada ao pior controle da mistura ar combustível nesses veículos, quando comparados aos veículos leves de passageiros (CHAN et al., 1995; HEEB et al., 2008; DAEMME et al., 2014d).



## 7 CONCLUSÕES

A presente pesquisa investigou as emissões regulamentares e não regulamentares em veículos leves de passageiros e motocicletas com diferentes tecnologias, combustíveis e diversos estágios de degradação. Como resultado determinaram-se os fatores de emissão, utilizando-se de dados da literatura, ensaios normalizados e modelos matemáticos de projeções.

A estimativa dos fatores de emissão para o NMHC, CH<sub>4</sub> e aldeídos através de uma relação com as emissões de THC apresentou uma forte correlação, possibilitando estimar as emissões desses compostos a partir das informações do total de hidrocarbonetos. Observou-se, ainda, por meio dos dados experimentais, que a relação utilizada pelo modelo do IEV para estimar as emissões de NMHC e CH<sub>4</sub> em motocicletas gera fatores de emissão superiores em até três vezes para o CH<sub>4</sub> comparando-se um mesmo valor de emissão de THC.

O modelo utilizado pelo IEV para simular as emissões de motocicletas apresenta um maior peso para os veículos da fase Pré-PROMOT devido aos elevados fatores de emissão arbitrados a essa fase. O uso desses fatores, aliados à não consideração da degradação para os motocicletas fabricados após a implementação do PROMOT, gera um modelo simulando uma redução contínua nas emissões a cada ano. No modelo do IEV essa queda tem maior influência devido à substituição dos veículos PP por novos, com fatores de emissão menores e constantes. No modelo proposto, considerando a degradação das emissões nos motocicletas após entrada em vigor do PROMOT, e utilizando fatores de emissão menores para fase PP, observa-se que a redução estimada não é contínua e, para o caso do NO<sub>x</sub>, houve uma tendência de elevação.

As projeções das emissões anuais da frota de motocicletas com uso dos fatores de emissão com degradação demonstram que apenas a implantação de novos limites de emissões não é suficiente para garantir uma redução contínua das emissões globais. Sob esse aspecto, a necessidade de efetivamente se implantar o processo de inspeção veicular previsto na legislação faz-se necessário para garantir a eficiência do programa de controle das emissões veiculares.

O acúmulo de quilometragem propicia um aumento significativo nas emissões. Segundo o modelo proposto, após o décimo ano de uso, as emissões dos motocicletas das fases M2 e M3 ficam, em média, quatro vezes maiores que as

emissões iniciais para o CO. Para veículos leves de passageiros, esse incremento fica entre duas a quatro vezes da emissão inicial. Assim a implantação de uma política de renovação de frota pode gerar reduções significativas nas emissões globais.

As simulações com cenários de emissões anuais da frota circulante do período de 1980 a 2020 indicam que a metodologia adotada pelo Inventário Nacional de Emissões Veiculares subestima as emissões de alguns compostos, como, por exemplo, a dos aldeídos. O modelo do IEV não considera as emissões de aldeídos por parte dos motocicletos, ficando sua estimativa aproximadamente 35% menor que os valores do modelo proposto para o ano de 2015. Por outro lado, superestima emissões de outros poluentes, como o metano: para esse composto o IEV apresenta uma emissão superior em aproximadamente 90% aos valores estimados por esta pesquisa.

Os fatores de emissão desenvolvidos na tese aprimoram as estimativas do último inventário nacional de emissões veiculares, como, por exemplo, corrigindo a relação THC/NMHC usada nas estimativas de emissões de motocicletos, sendo uma alternativa para se determinar cenários de emissões automotivas para estudos da qualidade do ar e instrumentos de políticas públicas. O método proposto para estimar os fatores de emissão da frota com uso de equações a partir da entrada do ano a ser simulado demonstrou ser viável e de fácil uso.

Em específico, alguns resultados merecem destaque, tais como a estimativa do fator de emissões para amônia, que vem sendo foco de pesquisas em diversos países. Os valores obtidos podem auxiliar na verificação do impacto dessas emissões na atmosfera e seus efeitos na formação de material particulado secundário, tornando mensurável a avaliação da importância das emissões desse composto.

Os resultados demonstraram que a deterioração da combustão e do controle de emissões pode ser representada pelo fator ano de uso e correspondente fase tecnológica dos veículos. Essa informação permite realizar projeções de emissões de frota de forma direta com os anos de uso dos veículos da frota.

A utilização dos fatores de emissão simulando a degradação apresenta um potencial para gerar modelagens de dispersão atmosférica de poluentes com maior representatividade nas condições reais. Ainda, indicadores técnicos mais precisos,

abrangentes e peculiares às condições brasileiras contribuem para o desenvolvimento de políticas públicas com maiores chances de êxito.

Quanto aos diferentes combustíveis utilizados nos experimentos, observou-se uma redução global das emissões para o combustível A22-S50 quando comparado com as demais gasolinas. A redução do teor de enxofre apresentou redução de até 40% nas emissões médias para os veículos leves de passageiros com sistema de injeção *flex fuel*. Com uso do fator comparativo apresentado é possível inferir mudanças nos cenários de emissões veiculares propostos por inventários. Por exemplo, como o ocorrido com a redução do teor de enxofre da gasolina comercial em 2014, de S800 para S50, dessa forma, aprimorando o detalhamento de inventários de emissões veiculares.

A determinação do fator comparativo entre os combustíveis testados permite observar as tendências das emissões ocasionadas por veículos leves de passageiros e motocicletas, possibilitando um entendimento global das potenciais alterações nos padrões de emissões veiculares ocasionados por alterações na matriz de combustíveis.

## 7.1 RECOMENDAÇÕES

Os inventários de emissões veiculares necessitam de um aprimoramento contínuo de seus bancos de dados e inclusão de novos gases, possibilitando a criação de cenários mais realistas. Assim, sugere-se:

- Estudos para determinar fatores de emissão de material particulado, massa e tamanho de partículas, emitidos por motocicletas e veículos leves do ciclo Otto com o uso dos combustíveis que compõem a matriz nacional;
- Atualizar os dados de ensaios da base do Inventário Nacional de Emissões, efetuando-se análises em veículos usados da frota, conforme proposta do presente estudo, em periodicidade bianual, visando, dessa forma, um ajuste contínuo dos fatores de emissão;

Sugere-se, também, o desenvolvimento de pesquisa semelhante abordando os veículos do ciclo Diesel, com determinação de fatores de emissão não regulamentadas dos compostos abordados nesta pesquisa (aldeídos, N<sub>2</sub>O e amônia), além de um estudo para investigar o impacto das alterações propostas na

matriz de combustíveis, com o aumento de teor de biodiesel, nas emissões não regulamentadas de aldeídos,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs).

A emissão veicular de amônia vem sendo discutida por diversos autores, porém, como se trata de uma emissão sem regulamentação, não há um limite de emissão ou uma estimativa de valores que sejam representativos. Sugere-se, então, que o composto tenha sua concentração monitorada nos grandes centros urbanos, bem como que sejam efetuados estudos da sua participação na formação de material particulado ultrafino.

## REFERÊNCIAS

ABD-ALLA, G. H. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 8, p. 1027-1042, May 2002. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890401000917>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6601**: Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2012a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7024**: Veículos rodoviários automotores leves — Medição do consumo de combustível - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8689**: Veículos rodoviários automotores leves — Combustíveis para ensaio — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10312**: Veículos rodoviários automotores leves — Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10972**: Veículos rodoviários automotores leves - Medição da concentração de monóxido de carbono no gás de escapamento em regime de marcha lenta - Ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 2010b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11481**: Veículos rodoviários automotores leves - Medição de emissão evaporativa. Rio de Janeiro, 2010c.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12026**: Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de aldeídos e cetonas contidos no gás de escapamento, por cromatografia líquida - Método DNPH. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15598**: Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de etanol não queimado contido no gás de escapamento, por cromatografia gasosa - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16369**: Motociclos e veículos similares - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2015.

ABRACICLO - Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares. **Anuário da indústria brasileira de duas rodas - 2012**. São Paulo, 2012. p. 180.

ABRACICLO - Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares. **Anuário da indústria brasileira de duas rodas - 2013**. São Paulo, 2013. p. 180.

ABRACICLO - Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares. **Anuário da indústria brasileira de duas rodas - 2016**. São Paulo, 2016. p. 196.

ABRACICLO - Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares. **Anuário da indústria brasileira de duas rodas - 2017**. São Paulo, 2017. p. 196.

ABRANTES, R. de et al. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from gasohol and ethanol vehicles. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 3, p. 648-654, Jan. 2009. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008009382>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ABRANTES, R. de.; ASSUNÇÃO, J. V. de; HIRAI, E. Y. Caracterização das emissões de aldeídos de veículos do ciclo diesel. **Revista de Saúde Pública**, v. 39, n. 3, p. 479-485, June 2005. ISSN 0034-8910. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-89102005000300021&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89102005000300021&nrm=iso)>. Acesso em: 06 set. 2015.

ADACHI, M.; NAKAMURA, H. (Eds.) **Engine emissions measurement handbook**. SAE International; Horiba Ltd., 2014. Product Code of JPF-HOR-002. ISBN 978-0-7680-8012-4.

ADAMS, E. C.; SKOGLUNDH, M.; CARLSSON, P.-A. Ammonia formation from nitric oxide over Pd-based catalysts in multicomponent feed gas compositions. **Catalysis Communications**, v. 95, p. 26-30, May 2017. ISSN 1566-7367. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156673671730081X>>. Acesso em: 06 set. 2015.

AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. Comissões Técnicas - CT - Aldeídos para motocicletas. 2015a. Disponível em: <<http://aea.org.br/v1/sobre-aea/quem-somos/comissoes-tecnicas/>>. Acesso em: 06 set. 2015.

AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. Grupos de Trabalho - GT - Emissões evaporativas. 2015b. Disponível em: <<http://aea.org.br/v1/sobre-aea/quem-somos/comissoes-tecnicas/>>. Acesso em: 07 out. 2015.

AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 3, p. 233-271, June 2007. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000384>>. Acesso em: 06 set. 2015.

AGARWAL, A. K. et al. Particulate emissions from biodiesel fuelled CI engines. **Energy Conversion and Management**, v. 94, p. 311-330, Apr. 2015. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415000023>>. Acesso em: 06 set. 2015.

AGARWAL, D.; SINGH, S. K.; AGARWAL, A. K. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine. **Applied Energy**, v. 88, n. 8, p. 2900-2907, Aug. 2011. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911000845>>. Acesso em: 06 set. 2015.

AKUTSU, Y. et al. Effect of exhaust from alcohol fuel on ozone formation in the atmosphere. **Atmospheric Environment. Part A. General Topics**, v. 25, n. 7, p. 1383-1389, 1991. ISSN 0960-1686. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960168691902475>>. Acesso em: 06 set. 2015.

AL-GHOUTI, M. A.; AL-DEGS, Y. S.; AMER, M. Determination of motor gasoline adulteration using FTIR Spectroscopy and multivariate calibration. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 1105-1112, Sept. 2008. ISSN 0039-9140. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914008003810>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ALVIM, D. S. et al. Estudos dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio na cidade de São Paulo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, p. 189-196, 2011. ISSN 1413-4152. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522011000200013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522011000200013&nrm=iso)>. Acesso em: 06 set. 2015.

AN, F.; SAUER, A. Comparison of passenger vehicle fuel economy and greenhouse gas emission standards around the world. **Pew Center on Global Climate Change**, v. 25, Dec. 2004.

ANDERSSON, J. D.; LANCE, D. L.; JEMMA, C. A. **DfT motorcycle emissions measurement programmes: unregulated emissions results**. SAE Technical Paper 2003-01-1898, 2003.



ANDRADE, M. et al. Vehicle emissions and PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 1, p. 79-88, 2012. ISSN 1873-9318.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da indústria automobilística brasileira**. São Paulo: IPSIS, 2017. 158 p.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores)**: as fases passadas e futuras. 2009. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/documentos/SeminarioItem1.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2015.

ANP - Agência Nacional de Petróleo. **Teor médio de enxofre na gasolina brasileira**. 2014. Disponível em: <[www.anp.gov.br/anexos/.../graficos\\_teor\\_de\\_enxofre.docx](http://www.anp.gov.br/anexos/.../graficos_teor_de_enxofre.docx)>. Acesso em: 13 set. 2015.

ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos. **Transporte e Meio Ambiente no Brasil**. Disponível em: <<http://www.cntdespoluir.org.br/Documents/PDFs/transportemeioambiente.pdf>>. 2011. Acesso em: 07 jun. 2015.

AVL. **Air pollution and emissions**. 2014. Disponível em: <[www.avl.com](http://www.avl.com)>. Acesso em: 22 jun. 2015.

BALKI, M. K.; SAYIN, C.; CANAKCI, M. The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. **Fuel**, v. 115, p. 901-906, Jan. 2014. ISSN 0016-2361.

BARBIER JR., J.; DUPREZ, D. Steam effects in three-way catalysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 4, n. 2-3, p. 105-140, Sept. 1994. ISSN 0926-3373. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0926337394800464>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BARLOW, T. J. et al. **A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions**. Wokingham : TRL, 2009. ISBN 184608816X.

BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. ISBN 8526803360.

BASTIN, C.; SZKLO, A.; ROSA, L. P. Diffusion of new automotive technologies for improving energy efficiency in Brazil's light vehicle fleet. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3586-3597, July 2010. ISSN 0301-4215.



BATTYE, W.; ANEJA, V. P.; ROELLE, P. A. Evaluation and improvement of ammonia emissions inventories. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 27, p. 3873-3883, Apr. 2003. ISSN 1352-2310.

BECK, D. D.; SOMMERS, J. W.; DIMAGGIO, C. L. Impact of sulfur on model palladium-only catalysts under simulated three-way operation. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 3, n. 2-3, p. 205-227, Feb. 1994. ISSN 0926-3373. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0926337393E0035A>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BECK, M. J.; ROSE, J. M.; HENSHER, D. A. Environmental attitudes and emissions charging: An example of policy implications for vehicle choice. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 50, p. 171-182, Apr. 2013. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856413000220>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BECKER, K. et al. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from vehicles. **Environmental Science & Technology**, v. 33, n. 22, p. 4134-4139, Oct. 1999. ISSN 0013-936X.

BEHRENTZ, E. et al. Measurements of nitrous oxide emissions from light-duty motor vehicles: a pilot study. **Atmospheric Environment**, v. 38, n. 26, p. 4291-4303, Ago. 2004. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231004004303>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BERMÚDEZ, V. et al. Effects of low pressure exhaust gas recirculation on regulated and unregulated gaseous emissions during NEDC in a light-duty diesel engine. **Energy**, v. 36, n. 9, p. 5655-5665, Sept. 2011. ISSN 0360-5442.

BIELACZYK, P. et al. A comparison of ammonia emission factors from light-duty vehicles operating on gasoline, liquefied petroleum gas (LPG) and compressed natural gas (CNG). **SAE International Journal of Fuels and Lubricants**, v. 5, p. 751-759, 2012. ISSN 1946-3960.

BISWAS, S. et al. Physical properties of particulate matter (PM) from late model heavy-duty diesel vehicles operating with advanced PM and NO<sub>x</sub> emission control technologies. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 22, p. 5622-5634, July 2008. ISSN 1352-2310.

BLACK, F. M.; HIGH, L. E.; LANG, J. M. Composition of automobile evaporative and tailpipe hydrocarbon emissions. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 30, n. 11, p. 1216-1220, 1980. ISSN 0002-2470.

BORSARI, V. As emissões veiculares e os gases do efeito estufa. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DA MOBILIDADE - SAE BRASIL, 14., 2005, São Paulo. **Proceedings...** SAE International, 2005.

BORSARI, V. **Caracterização das emissões de gases de efeito estufa por veículos automotores leves no Estado de São Paulo**. 2009. 207 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2009.

BORSARI, V. **Emissão de amônia de veículo automotor leve e sua importância para a Saúde Ambiental**. 2015. 180 f. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BORSARI, V.; ASSUNÇÃO, J. V. de. Ammonia emissions from a light-duty vehicle. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 51, n. Supplement C, p. 53-61, Mar. 2017. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916304151>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BORSARI, V.; ASSUNÇÃO, J. V. de. As emissões de gases de efeito estufa por veículos automotores leves. **InterfaceHS-Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 5, n. 2, 2010. ISSN 1980-0894.

BORSARI, V.; ASSUNÇÃO, J. V. de. Nitrous oxide emissions from gasohol, ethanol and CNG light duty vehicles. **Climatic change**, v. 111, n. 3-4, p. 519-531, Apr. 2012. ISSN 0165-0009.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. Edgard Blucher, 2005. ISBN 8521203780.

BOWMAN, C. T. Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 1, n. 1, p. 33-45, 1975. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128575900052>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BRANCO, F. C. et al. Benefícios ambientais e resultados do programa de inspeção e manutenção de São Paulo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 677-696.

BRANCO, G. M. et al. Controle de emissão de compostos orgânicos com base no potencial de formação de ozônio. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 637-654.

BRANCO, G. M.; BRANCO, F. C.; BLUMRICH, S. **25 anos do Catalisador Automotivo e 30 anos do PROCONVE**: Uma estratégia de sucesso. Americana, SP: Umicore Brasil, 2016. 58 p.

BRANCO, M. C. **A inspeção veicular como instrumento de controle da poluição atmosférica nas grandes cidades**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BRASIL. Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 07 jun. 1990. P. 10887.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 set. 1981. Seção 1, p. 16509.

BRASIL. Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 mar. 2016. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 jun. 1986. Seção 1, p. 8792-8795.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 297, de 26 de fevereiro de 2002. Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos. **Diário Oficial da União nº 51**, Brasília, DF, 15 mar. 2002. Seção 1, p. 86-88.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009. Dispõe sobre critérios para elaboração de Planos de Controle da Poluição Veicular - PCVV e Programas de Inspeção Veicular - I/M.. **Diário Oficial da União nº 226**, Brasília, DF, 26 nov. 2009. P. 81-84.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 432, de 13 de julho de 2011. Estabelece novas fases de controle de emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União nº 134**, Brasília, DF, 14 jul. 2011. P. 69.

BURGARD, D. A.; BISHOP, G. A.; STEDMAN, D. H. Remote sensing of ammonia and sulfur dioxide from on-road light duty vehicles. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 22, p. 7018-7022, 2006. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es061161r>>. Acesso em: 06 set. 2015.

BURNETT, R. T. et al. The Association between ambient carbon monoxide levels and daily mortality in Toronto, Canada. **Journal of the Air & Waste Management**

**Association**, v. 48, n. 8, p. 689-700, 1998. ISSN 1096-2247. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10473289.1998.10463718>>. Acesso em: 06 set. 2015.

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. BRevê: an objective approach to calculate emission rates for the Brazilian vehicle fleet characteristics. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 19, n. SPE, p. 13-20, 2014. ISSN 1413-4152.

CARB - California Air Resources Board. **SOP No. MLD 147**: Procedure for the determination of ammonia in automotive exhaust by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Califórnia: CARB, 2007.

CARVALHO, C. H. R. de. Emissões relativas de poluentes do transporte urbano. 2011. **IPEA - Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, v. 5, p. 123-139, jun. 2011.

CARVALHO, V. S. B. et al. Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 68-79, Mar. 2015. ISSN 1462-9011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901114002081>>. Acesso em: 06 set. 2015.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2012**. São Paulo: CETESB, 2013a. 108 p. (Série Relatórios). Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2017/09/relatorio-2012.pdf>>. Acesso em: 08 jun 2015.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissão Veicular - Combustíveis**. 2013b. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/veicular/combustiveis>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016. 214 p. (Série Relatórios). Disponível em: <[http://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2013/12/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2015-v4\\_.pdf](http://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2013/12/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2015-v4_.pdf)>. Acesso em: 08 jun 2016.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório da qualidade do ar no estado de São Paulo 2009**. São Paulo: CETESB, 2010. 209 p. (Série Relatórios).

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório da qualidade do ar no estado de São Paulo 2014**. São Paulo: CETESB, 2015. 134 p. (Série Relatórios).

CFR - Code of Federal Regulations. **Title 40 Part 86**: Control of emissions from new and in-use highway vehicles and engines (continued). Washington DC: US Government Printing Office, 2000.

CFR - Code of Federal Regulations. **Title 40, Part 1065**: Engine-testing procedures. Washington DC: US Government Printing Office, 2012.

CHAN, C.-C. et al. Comparison of tail-pipe emissions from motorcycles and passenger cars. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 45, n. 2, p. 116-124, 1995. ISSN 1096-2247.

CHARLTON, S. J. **Developing diesel engines to meet ultra-low emission standards**. SAE Technical Paper 2005-01-3628, 2005.

CHOCK, D. P. et al. Sensitivity of urban airshed model results for test fuels to uncertainties in light-duty vehicle and biogenic emissions and alternative chemical mechanisms - auto/oil air quality improvement research program. **Atmospheric Environment**, v. 29, n. 21, p. 3067-3084, Nov. 1995. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223109500124H>>. Acesso em: 06 set. 2015.

CIENFUEGOS, F.; VAITSMAN, D. **Análise instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000.

CIFUENTES, L. A. et al. **Economic and environmental valuation applied to air quality management and pollution control cases**. Report for the Regional Policy Dialogue of the Inter-American Development Bank, Feb. 2004.

COCKER, D. R. et al. Development and application of a mobile laboratory for measuring emissions from diesel engines. 1. Regulated gaseous emissions. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 7, p. 2182-2189, 2004. ISSN 0013-936X.

COLARES, J. F. A brief history of Brazilian biofuels legislation. **Syracuse Journal of Law & Commerce**, v. 35, n. 2, June 2008.

CONTROLAR. Inspeção Ambiental Veicular. **Relatório Anual 2010**. Disponível em: <<http://www.controlar.com.br/pdf/RelatorioAnualControlar2010.pdf>>. 2011. Acesso em: 06 jun. 2015.

CORRÊA, S. M. et al. Five years of formaldehyde and acetaldehyde monitoring in the Rio de Janeiro downtown area – Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 19, p. 2302-2308, June 2010. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231010002694>>. Acesso em: 06 set. 2015.

CORRÊA, S. M.; ARBILLA, G. Aromatic hydrocarbons emissions in diesel and biodiesel exhaust. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 35, p. 6821-6826, Nov. 2006. ISSN 1352-2310.

CORRÊA, S. M.; ARBILLA, G. Carbonyl emissions in diesel and biodiesel exhaust. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 4, p. 769-775, Feb. 2008. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007008746>>. Acesso em: 06 set. 2015.

CORREIA, E. L. Proálcool-do sucesso à polêmica. **Agroanalysis**, v. 16, n. 8, p. 12-16, ago. 1996. ISSN 0100-4298.

CRANE, M. E. et al. **Reduced cold-start emissions using rapid exhaust port oxidation (REPO) in a spark-ignition engine**. SAE Technical Paper 970264, 1997.

DAEMME, L. C. **Estudo da emissão de aldeídos em motocicletas**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia – PRODETEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Curitiba, 2012.

DAEMME, L. C. et al. **An investigation on aldehyde and ammonia emissions from a 4-stroke gasoline-fueled motorcycle. ammonia emission reduction by using a SCR catalyst**. SAE Technical Paper 2013-36-0181, 2013.

DAEMME, L. C. et al. **Comparison of energetic efficiency of motorcycles with electric and internal combustion engines**. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 16., 2016, Vitória, ES. **Proceedings...** Vitória, ES: ABCM, 2016a. 6 p. Disponível em: <<http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/1244>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

DAEMME, L. C. et al. Emissão de material particulado em veículos Flex Fuel de injeção direta de combustível. In: PRÊMIO AEA DE MEIO AMBIENTE, 10., 2016b. **Trabalhos Vencedores – Categoria Tecnologia**. Disponível em: <<http://www.aea.org.br/premio/downloads/2016>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

DAEMME, L. C. et al. Emissions of criteria and non-criteria pollutants by a flex-fuel motorcycle. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 27, n. 12, São Paulo, p. 2192-2202, Dec. 2016c. ISSN 0103-5053.

DAEMME, L. C. et al. Estudo preliminar sobre a influência do teor de enxofre do combustível na emissão de amônia em motocicletas e veículos leves dos ciclos Otto e Diesel. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014a. p. 627-636.

DAEMME, L. C. et al. **Particulate matter emissions from a flexfuel gasoline direct injection vehicle**. SAE Technical Paper 2015-36-0401, 2015.

DAEMME, L. C. et al. Redução da emissão de amônia em motocicletas com uso de um catalisador SCR. In: PRÊMIO AEA DE MEIO AMBIENTE, 8., 2014b. **Trabalhos**



Vencedores – Categoria Acadêmica. Disponível em:  
<<http://www.aea.org.br/premio/downloads/2014/trabalhos/TB000191.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2015.

DAEMME, L. C. et al. **Regulated and non-regulated emissions from a light-duty diesel car fueled with different diesel sulfur content**. SAE Technical Paper 2014-36-0110, 2014c.

DAEMME, L. C. et al. **Regulated and unregulated emissions from a Flex Fuel motorcycle fuelled with various gasoline/ethanol blends**. SAE Technical Paper 2014-32-0032, 2014d.

DAEMME, L. C. et al. **Study of the energy efficiency and Greenhouse emissions from motorcycles powered by electric and internal combustion engines**. SAE Technical Paper 2017-36-0155 International, 2017.

DAEMME, L. C. et al. **The effect of fuel sulfur content on ammonia, aldehyde and regulated emissions emitted from a Euro III motorcycle**. SAE Technical Paper 2016-36-0158, 2016d.

DAEMME, L. C.; PENTEADO, R.; FERREIRA, R. Estudo das emissões de aldeídos geradas em motocicletas. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2010, 18., 2010, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: AEA, 2010.

DAEMME, L. C.; PENTEADO, R.; FERREIRA, R. S. Emissões legisladas e não-legisladas geradas em um veículo automotor leve do ciclo Diesel. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2011, 19., São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: AEA, 2011.

DAEMME, L. C.; PENTEADO, R.; MELO, T. Comparativo entre as metodologias tradicionais de medição de emissões veiculares com a técnica FTIR. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2012, 20., 2012, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: AEA, 2012.

DAEMME, L. C.; PENTEADO, R.; ZOTIN, F. M. Z. Emissão de aldeídos em motociclo Flex Fuel, abastecido com combustíveis E22, E61 e E100. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2012, 20., 2012, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: AEA, 2012.

DASCH, J. M. Nitrous oxide emissions from vehicles. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 42, n. 1, p. 63-67, 1992. ISSN 1047-3289.

DELPHI. **Worldwide Emissions Standards - 2016/2017**. Disponível em:  
<<https://www.delphi.com/sites/default/files/inline-files/delphi-worldwide-emissions-standards-passenger-cars-light-duty-2016-7.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

DEMIRBAS, A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. **Applied Energy**, v. 86, p. S108-S117, 2009. ISSN 0306-2619.

DEMUYNCK, J. et al. Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC. **Energy Policy**, v. 49, p. 234-242, Oct. 2012. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512005101>>. Acesso em: 06 set. 2015.

DIAS, C.; BALES, M. P.; SILVA, S. R. da. A evolução das emissões veiculares no estado de São Paulo com a inclusão das emissões de abastecimento, no período de 2006 a 2014. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2015, 23., 2015, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2015. p. 82-98.

DIAS, C.; BALES, M. P.; SILVA, S. R. da. A evolução das emissões veiculares no estado de São Paulo: uma nova abordagem no período de 2009 a 2012. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014a. p. 172-183.

DIAS, C.; BALES, M. P.; SILVA, S. R. da. O aperfeiçoamento das estimativas das emissões veiculares no estado de São Paulo, no período de 2008 a 2013. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014b. p. 178-188.

DIGIULIO, C. D. et al. Passive-ammonia selective catalytic reduction (SCR): Understanding NH<sub>3</sub> formation over close-coupled three way catalysts (TWC). **Catalysis Today**, v. 231, p. 33-45, Aug. 2014. ISSN 0920-5861. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586114000625>>. Acesso em: 06 set. 2015.

DRÖGE, R. et al. **Emissions of two-wheeled vehicles**. Utrecht: TNO, 2011. 75 p. TNO-report, TNO-060-UT-2011-01556, Aug. 2011.

DUARTE, G. O.; GONÇALVES, G. A.; FARIAS, T. L. A Methodology to estimate real-world vehicle fuel use and emissions based on certification cycle data. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 111, p. 702-710, Feb. 2014. ISSN 1877-0428. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814001050>>. Acesso em: 06 set. 2015.

DUNKER, A. M. et al. Photochemical modeling of the impact of fuels and vehicles on urban ozone using auto/oil program data. **Environmental Science & Technology**, v. 30, n. 3, p. 787-801, 1996. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es950175m>>. Acesso em: 06 set. 2015.



DURBIN, T. D. et al. Effects of fuel ethanol content and volatility on regulated and unregulated exhaust emissions for the latest technology gasoline vehicles.

**Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 11, p. 4059-4064, 2007. ISSN 0013-936X.

DURBIN, T. D. et al. Estimates of the emission rates of ammonia from light-duty vehicles using standard chassis dynamometer test cycles. **Atmospheric**

**Environment**, v. 36, n. 9, p. 1475-1482, Mar. 2002. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231001005830>>. Acesso em: 06 set. 2015.

DURBIN, T. D. et al. Investigation of emission rates of ammonia, nitrous oxide and other exhaust compounds from alternative fuel vehicles using a chassis dynamometer. **Internacional Journal of Automotive Technology**, v. 4, n. 1, p. 9-19, 2003.

DURBIN, T. D.; NORBECK, J. M.; HUAI, T. **Investigation of emission rates of ammonia and other toxic and lowlevel compounds using FTIR**. Final Report submitted to SCAQMD - South Coast Air Quality Management District, Contract n. 99131, Sept. 2001.

EC - European Union. European Commission. Commission Regulation (EU) no. 64/2012 of 23 January 2012 amending regulation (EU) no. 582/2011 implementing and amending regulation (EC) no. 595/2009 of the european parliament and of the council with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) text with eea relevance. **Official Journal of the European Union**, L 28, v. 55, 31 Jan. 2012.

EC - European Union. European Parliament, Council of the European Union. Directive 97/24/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 1997 on certain components and characteristics of two or three-wheel motor vehicles. **Official Journal of the European Communities**, L 226, v. 40, 18 Aug. 1997.

EYIDOĞAN, M. et al. Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine. **Fuel**, v. 89, n. 10, p. 2713-2720, Oct. 2010. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110000402>>. Acesso em: 06 set. 2015.

FAIZ, A.; WEAVER, C. S.; WALSH, M. P. **Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions**. World Bank Publications, 1996. ISBN 0821334441.

FARRAUTO, R. J.; HECK, R. M. Catalytic converters: state of the art and perspectives. **Catalysis Today**, v. 51, n. 3-4, p. 351-360, July 1999. ISSN 0920-5861. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586199000243>>. Acesso em: 06 set. 2015.

FAVRE, C. et al. **An emissions performance evaluation of State-of-the-Art motorcycles over EURO 3 and WMTC Drive cycles**. SAE Technical Paper 2009-01-1841, 2009.

FENGER, J. Air pollution in the last 50 years: from local to global. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 1, p. 13-22, Jan. 2009. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008008960>>. Acesso em: 06 set. 2015.

FERREIRA, S. L. et al. Análise por cromatografia gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (B10). **Química Nova**, v. 31, n. 3, p. 539-545, 2008. ISSN 0100-4042.

FHWA - Federal Highway Administration USA. **The Vehicle Fleet**. (Publication No. FHWA-PL-01-1012). Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/ohim/onh00/onh2p3.htm>>. Acesso em: 25 out. 2015.

FONTARAS, G.; DILARA, P. The evolution of European passenger car characteristics 2000–2010 and its effects on real-world CO<sub>2</sub> emissions and CO<sub>2</sub> reduction policy. **Energy Policy**, v. 49, p. 719-730, 2012. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512006027>>. Acesso em: 06 set. 2015.

FORCETTO, A. L. S.; DAEMME, L. C. Beyond noise: gaseous pollution of motorcycles' replacement exhaust systems in Sao Paulo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2016, 24., 2016, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2016. p. 240-247.

FORCETTO, A. L. S.; DAEMME, L. C. Environmental impact of motorcycle replacement exhaust systems in Sao Paulo City. **WIT Press**, v. 210, p. 641-652, 2017. ISSN 1743-3541. Disponível em: <<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SDP16/SDP16054FU1.pdf>>. Acesso em: 06 set. 2015.

FRAGA SYSTEM. Banco de dados relativo à frota brasileira de veículos.. Edição 2012. 1 CD.

FREITAS, L. C. de.; KANEKO, S. Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil. **Energy Economics**, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 1146-1154, 2011. ISSN 0140-9883.

FU, L. et al. Assessment of vehicular pollution in China. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 51, n. 5, p. 658-668, 2001. ISSN 1047-3289.

FUKUDA, K. et al. **Impact study of high biodiesel blends on performance of exhaust aftertreatment systems**. SAE Technical Paper 2008-01-2494, 2008.

GABRIELSSON, P. L. T. Urea-SCR in automotive applications. **Topics in catalysis**, v. 28, n. 1-4, p. 177-184, Apr. 2004. ISSN 1022-5528.

GARCIA, L. F. A. et al. Measurements of emissions from motorcycles and modeling its impact on air quality. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 375-384, Mar. 2013. ISSN 0103-5053.

GECKLER, S. et al. **Development of a desulfurization strategy for a NOx adsorber catalyst system**. SAE Technical Paper 2001-01-0510, 2001.

GEIVANIDIS, S. et al. **Study on possible new measures concerning motorcycle emissions**. Report No: 08.RE.0019.V2, Aristotle University Thessaloniki, Nov. 2008.

GERARD, D.; LAVE, L. B. Implementing technology-forcing policies: the 1970 clean air act amendments and the introduction of advanced automotive emissions controls in the United States. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 72, n. 7, p. 761-778, Sept. 2005. ISSN 0040-1625.

GIECHASKIEL, B. et al. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: from smoke and filter mass to particle number. **Journal of Aerosol Science**, v. 67, p. 48-86, Jan. 2014. ISSN 0021-8502.

GOMES, H. O. et al. Ultra low sulfur diesel fuel performance. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 67-82.

GREENING, P. European Vehicle Emission Legislation: present and future. **Topics in Catalysis**, v. 16-17, n. 1-4, p. 5-13, Sept. 2001. ISSN 1022-5528. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1016629326634>>.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, p. 434-445, nov. 2011. ISSN 1984-6835.

GUIMARÃES, L. E.; LEE, F. Levantamento do perfil e avaliação da frota de veículos de passeio brasileira visando racionalizar as emissões de dióxido de carbono. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 3, p. 577-591, dez. 2010. ISSN 0103-1570.

GUMUS, M. Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system. **Applied thermal engineering**, v. 29, n. 4, p. 652-660, Mar. 2009. ISSN 1359-4311.

GUO, H.; WANG, T.; LOUIE, P. K. K. Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong: Application of a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model. **Environmental Pollution**, v. 129, n. 3, p. 489-498, June 2004. ISSN 0269-7491. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749103004561>>. Acesso em: 06 set. 2015.

GUZZELLA, L.; SCIARRETTA, A. Vehicle energy and fuel consumption: basic concepts. In: GUZZELLA, L.; SCIARRETTA, A. **Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization**. Heidelberg: Springer, 2007. p. 13-41.

HAACK, L. P.; LACOURSE, D. L.; KORNISKI, T. J. Comparison of Fourier Transform Infrared Spectrometry and 2, 4-dinitrophenylhydrazine-impinger techniques for the measurement of formaldehyde in vehicle exhaust. **Analytical Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 68-72, Jan. 1986. ISSN 0003-2700.

HAO, L. J. et al. Investigation of NO<sub>x</sub> emissions from Euro-Iv Diesel buses using PEMS. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, AUTOMATION AND MECHANICAL ENGINEERING - EAME 2015, 2015, Phuket, Thailand. **Proceedings...** Atlantis Press, 2015. p. 242-244. Disponível em: <[http://download.atlantis-press.com/php/download\\_paper.php?id=22278](http://download.atlantis-press.com/php/download_paper.php?id=22278)>. Acesso em: 29 nov. 2016.

HAO, W. M. et al. Sources of Atmospheric nitrous oxide from combustion. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, n. D3, p. 3098-3104, Mar. 1987. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/JD092iD03p03098>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HARRINGTON, W. Fuel economy and motor vehicle emissions. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 33, n. 3, p. 240-252, July 1997. ISSN 0095-0696.

HARVEY, C. A. et al. **A study of the potential impact of some unregulated motor vehicle emissions**. SAE Technical Paper 830987, 1983.

HARVEY, N.; SAITO, J. HII: from pioneer to industry leader in automotive emissions measurement. **Readout** - Horiba Technical Reports, n. E06, p. 42,47, July 2003. Disponível em: <<http://www.horiba.com/uploads/media/RE06-09-042.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2015.

HASSANI, A.; HOSSEINI, V. An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 47, p. 1-12, Aug. 2016. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916302504>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HE, C. et al. Comparison of carbonyl compounds emissions from diesel engine fueled with biodiesel and diesel. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 24, p. 3657-3661, Aug. 2009. ISSN 1352-2310. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009003227>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HECK, R. M.; FARRAUTO, R. J. Automobile exhaust catalysts. **Applied Catalysis A: General**, v. 221, n. 1, p. 443-457, Nov. 2001. ISSN 0926-860X.

HEEB, N. V. et al. Three-way catalyst-induced formation of ammonia—velocity-and acceleration-dependent emission factors. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 31, p. 5986-5997, Oct. 2006. ISSN 1352-2310.

HEEB, N. V. et al. Trends of NO-, NO<sub>2</sub>-, and NH<sub>3</sub>-emissions from gasoline-fueled Euro-3- to Euro-4-passenger cars. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 10, p. 2543-2554, Mar. 2008. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223100701134X>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HELLER, B. et al. **Performance of a new system for emission sampling and measurement (SESAM)**. SAE Technical Paper 900275, 1990.

HERNER, J. D. et al. Nucleation mode particle emissions from in-use heavy duty vehicles equipped with DPF and SCR retrofits. In: ANNUAL AEROSOL CONFERENCE OF AMERICAN ASSOCIATION FOR AEROSOL RESEARCH, 26., 2007, Reno, Nevada. **Proceedings...** Reno, NV, 2007.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.

HEYWOOD, J. B. Pollutant formation and control in spark ignition engines. **Symposium (International) on Combustion**, v. 15, n. 1, p. 1191-1211, 1975. ISSN 0082-0784. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078475803833>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HEYWOOD, J. B. Pollutant formation and control in spark-ignition engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 1, n. 4, p. 135-164, 1976. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128576900125>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HIROSE, T. et al. **Investigations of the impact of 10% ethanol blended fuels on performances of sold gasoline vehicles in the Japanese market already on the road in Japan**. SAE Technical Paper 2011-01-1987, 2011.

HO, D. X.; KIM, K.-H. Effect of HPLC binary mobile phase composition on the analysis of carbonyls. **Environmental monitoring and assessment**, v. 180, n. 1-4, p. 163-176, Sept. 2011. ISSN 0167-6369.

HORIBA. **Motor exhaust gas analyzer mexa-7000 series**: instruction manual. Japan: 2007.

HOUNTALAS, D. T.; MAVROPOULOS, G. C.; BINDER, K. B. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions. **Energy**, v. 33, n. 2, p. 272-283, Feb. 2008. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544207001144>>. Acesso em: 06 set. 2015.

HUAI, T. et al. Estimates of the emission rates of nitrous oxide from light-duty vehicles using different chassis dynamometer test cycles. **Atmospheric Environment**, v. 38, n. 38, p. 6621-6629, Dec. 2004. ISSN 1352-2310.

HURN, R. W. Instrumentation and techniques for measuring emissions. In: SPRINGER, G. S.; PATTERSON, D. J. (Eds.). **Engine emissions**: pollutant formation and measurement. New York: Springer, 2012. Cap. 8, p. 291-317.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores** - Proconve/Promot/Ibama. 3. ed. Brasília: Ibama/Diqua, 2011. 584 p. (Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes - Gestão Ambiental, n. 3).

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Ibama assina acordo que institui Programa Brasileiro de Combustíveis, Tecnologias Veiculares e Emissões**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/noticias/58-2016/129-ibama-assina-acordo-que-institui-programa-brasileiro-de-combustiveis-tecnologias-veiculares-e-emissoes>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H. S., Miwa K., Srivastava N. e Tanabe K. (Eds.). Hayama: IGES, 2008.

IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change. Database on Greenhouse Gas Emission Factors. Bratislava, Slovak Republic, 2016. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

JIMÉNEZ-PALACIOS, J. L. **Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing**. 361 p. Thesis (Mechanical Engineering - Ph.D./Sc.D.) - Massachusetts Institute of Technology - MIT, Cambridge, 1999.

JOHNSON, T. Diesel engine emissions and their control. **Platinum Metals Review**, v. 52, n. 1, p. 23-37, 2008. ISSN 0032-1400.



KAMIMURA, A.; SAUER, I. L. The effect of flex fuel vehicles in the Brazilian light road transportation. **Energy Policy**, v. 36, n. 4, p. 1574-1576, 2008. ISSN 0301-4215.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution**, v. 151, n. 2, p. 362-367, Jan. 2008. ISSN 0269-7491. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749107002849>>. Acesso em: 06 set. 2015.

KARAVALLAKIS, G.; STOURNAS, S.; BAKEAS, E. Light vehicle regulated and unregulated emissions from different biodiesels. **Science of The Total Environment**, v. 407, n. 10, p. 3338-3346, May 2009. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709000035>>. Acesso em: 06 set. 2015.

KARLSSON, H. L. Ammonia, nitrous oxide and hydrogen cyanide emissions from five passenger vehicles. **Science of The Total Environment**, v. 334–335, p. 125-132, Dez. 2004. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704003651>>. Acesso em: 06 set. 2015.

KAWARABAYASHI, S. et al. Measurement of vehicle emissions with Fourier Transform Infrared (FTIR) method. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIAGNOSTICS AND MODELING OF COMBUSTION IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES, 2., Kyoto, Japan, 1990. **Proceedings...** Session OD-1, p. 365-369.

KEAN, A. J. et al. Trends in on-road vehicle emissions of ammonia. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 8, p. 1565-1570, Mar. 2009. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008008881>>. Acesso em: 06 set. 2015.

KIM, C. H. et al. **Three-way catalyst design for urealess passive ammonia SCR:** lean-burn SIDI aftertreatment system. SAE Technical Paper, 2011-01-0306, 2011.

KITTELSON, D. B. et al. On-road evaluation of two diesel exhaust aftertreatment devices. **Journal of Aerosol Science**, v. 37, n. 9, p. 1140-1151, Sept. 2006. ISSN 0021-8502.

KLEEMANN, M. et al. Investigation of the ammonia adsorption on monolithic SCR catalysts by transient response analysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 27, n. 4, p. 231-242, Aug. 2000. ISSN 0926-3373.

KOÇ, M. et al. The effects of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. **Renewable energy**, v. 34, n. 10, p. 2101-2106, Oct. 2009. ISSN 0960-1481.

KOEBEL, M.; ELSENER, M.; MADIA, G. **Recent advances in the development of urea-SCR for automotive applications.** SAE Technical Paper 2001-01-3625, 2001.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, p. 223-253, 2010. ISSN 0103-4014.

KRAHL, J. et al. **Review**: utilization of rapeseed oil, rapeseed oil methyl ester or diesel fuel: exhaust gas emissions and estimation of environmental effects. SAE Technical Paper, 962096, 1996.

KRUSE, R.; HULS, T. **Development for the federal urban driving cycle**. SAE Technical Paper 730553, 1973.

KUHLER, M.; KARSTENS, D. **Improved driving cycle for testing automotive exhaust emissions**. SAE Technical Paper 780650, 1978.

KUMAR, S. et al. Aldehyde, Ketone and Methane emissions from motor vehicle exhaust: a critical review. **American Chemical Science Journal**, v. 1, n. 1, p. 1-27, 2011.

INSTITUTOS LACTEC. Disponível em: < <http://www.institutoslactec.org.br/>>. Acesso em: 06 set. 2015.

LANÇAS, F. M. **Cromatografia em fase gasosa**. São Carlos: Acta, 1993.

LANÇAS, F. M. **Cromatografia líquida moderna: HPLC/CLAE**. Campinas: Átomo, 2009.

LASHOF, D. A.; AHUJA, D. R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. **Nature**, v. 344, n. 6266, p. 529-531, Apr. 1990. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/344529a0>>. Acesso em: 06 set. 2015.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 455 p.

LAVE, L. B.; SESKIN, E. P. Air pollution and human health. **Science**, v. 169, n. 3947, p. 723, Aug. 1970. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/content/169/3947/723.abstract>>. Acesso em: 06 set. 2015.

LEA-LANGTON, A.; LI, H.; ANDREWS, G. E. **Investigation of aldehyde and VOC emissions during cold start and hot engine operations using 100% biofuels for a DI engine**. SAE Technical Paper 2009-01-1515, 2009.

LEE, J. et al. Forcing technological change: a case of automobile emissions control technology development in the US. **Technovation**, v. 30, n. 4, p. 249-264, Apr. 2010. ISSN 0166-4972.

LEGGE, S. **A comparison of the US and European auto/oil programmes**. Oxford: Institute for Energy Studies, 1997. ISBN 1901795012.



LIPMAN, T. E.; DELUCCHI, M. A. Emissions of nitrous oxide and methane from conventional and alternative fuel motor vehicles. **Climatic Change**, v. 53, n. 4, p. 477-516, June 2002. ISSN 1573-1480. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1015235211266>>. Acesso em: 06 set. 2015.

LIVINGSTON, C. G. **Development and application of a validated method for measurements of ammonia emissions from in-use vehicles on a chassis dynamometer**. 2008. 172 p. Thesys (Doctoral) - University of California, ProQuest, Los Angeles, 2008.

LIVINGSTON, C.; RIEGER, P.; WINER, A. Ammonia emissions from a representative in-use fleet of light and medium-duty vehicles in the California South Coast Air Basin. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 21, p. 3326-3333, July 2009. ISSN 1352-2310.

LOWRY, S. R.; KLEBBA, R. E.; ROBERTS, J. P. Direct comparisons of FTIR with conventional analyzers for the real-time measurement of vehicle emissions. In: OPTICAL SENSING FOR ENVIRONMENTAL AND PROCESS MONITORING, International Society for Optics and Photonics, McLean, Virginia, 1994. **Proceedings...** AWA, 1995. v. 2365, p. 106-116.

MACHIDA, T. et al. Increase in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 250 years. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 21, p. 2921-2924, Nov. 1995.

MACKINVEN, R.; HUBLIN, M. **European programme on emissions, fuels and engine technologies: objectives and design**. SAE Technical Paper 961065, 1996.

MAIBOOM, A.; TAUZIA, X.; HÉTET, J.-F. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine. **Energy**, v. 33, n. 1, p. 22-34, Jan. 2008. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544207001399>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MARTINES-FILHO, J. G.; BURNQUIST, H. L.; VIAN, C. E. F. Bioenergy and the rise of sugarcane-based ethanol in Brazil. **Choices**, v. 21, n. 2, p. 91-96, 2006. ISSN 08865558, 21622884. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/choices.21.2.0091>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MARTINS, E. M. et al. Atmospheric levels of aldehydes and BTEX and their relationship with vehicular fleet changes in Rio de Janeiro urban area. **Chemosphere**, v. 67, n. 10, p. 2096-2103, May 2007. ISSN 0045-6535. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653506011854>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MARTINS, G. D. A. **Estatística geral e aplicada**. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010. ISBN 8522486786.

MATSUMOTO, S. I. Recent advances in automobile exhaust catalysts. **Catalysis Today**, v. 90, n. 3, p. 183-190, July 2004. ISSN 0920-5861.

MAUZERALL, D. L. et al. NO<sub>x</sub> emissions from large point sources: variability in ozone production, resulting health damages and economic costs. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 16, p. 2851-2866, May 2005. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231005000907>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MCCABE, L. J. Initial results from the auto/oil air quality improvement research program. In: STP1160 - The Impact of U.S. Environmental Regulations on Fuel Quality, ASTM International, 1993. **Proceedings...**. ISSN 0066-0558.

MEJÍA-CENTENO, I.; CASTILLO, S.; FUENTES, G. A. Enhanced emissions of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub> from a Pd-only TWC and supported Pd model catalysts: light-off and sulfur level studies. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 119–120, p. 234-240, May 2012. ISSN 0926-3373. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337312000872>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MEJÍA-CENTENO, I. et al. Effect of low-sulfur fuels upon NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emission during operation of commercial three-way catalytic converters. **Topics in Catalysis**, v. 42-43, n. 1-4, p. 381-385, May 2007. ISSN 1022-5528. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11244-007-0210-2>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MELO, T. C. C. de et al. Como diferentes teores de biodiesel no diesel afetam as emissões de aldeídos em motores e veículos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 552-568.

MELO, T. C. C. de et al. Hydrous ethanol–gasoline blends: combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine. **Fuel**, v. 97, p. 796-804, July 2012. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611200227X>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MELO, T. C. C. de. **Modelagem termodinâmica de um motor do ciclo Otto tipo Flex-Fuel, funcionando com gasolina, álcool e gás natural**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

MELO, T. C. C. de; COLNAGO, K.; LOUREIRO, L. **Implantação dos gases orgânicos do tipo não metano (NMOG) no Brasil**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2009, 17., 2009, São Paulo. **Proceedings...**

MENEZES, E. W. de et al. Addition of an azeotropic ETBE/ethanol mixture in eurosuper-type gasolines. **Fuel**, v. 85, n. 17-18, p. 2567-2577, Dec. 2006. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623610600127X>>. Acesso em: 06 set. 2015.

MERKISZ, J. Combustion engines development and real driving emissions. **Journal of KONES Powertrain and Transport**, v. 21, n. 2, p. 209-219, 2014. ISSN 1231-4005.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. ISBN 857041451X.

MISONO, M. JCAP: Its outline and outcome. In: SAE INTERNATIONAL SPRING FUELS & LUBRICANTS MEETING AND EXPOSITION, Toulouse, France, 2004. **Proceedings...**

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **I Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. 2011. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2015.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. 2014. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario\\_de\\_Emissoes\\_por\\_Veiculos\\_Rodoviaros\\_2013.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2015.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resumo PROCONVE**. 2013. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE\\_atualizado%20em%2021nov13.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado%20em%2021nov13.pdf)>. Acesso em: 04 jun. 2015.

MORKNOY, D.; KHUMMONGKOL, P.; PRUEAKSASIT, T. Seasonal and diurnal concentrations of ambient formaldehyde and acetaldehyde in Bangkok. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 216, n. 1-4, p. 693-702, Mar. 2011. ISSN 0049-6979.

MOTTA, R. A.; SILVA, P. C. M. da; BRASIL, A. C. de M. Desafios da mobilidade sustentável no Brasil. **Revista dos Transportes Públicos – ANTP**, ano 34, p. 25-48, 2. quadrim. 2012.

NENTJES, A.; DE VRIES, F. P.; WIERSMA, D. Technology-forcing through environmental regulation. **European Journal of Political Economy**, v. 23, n. 4, p. 903-916, Dec. 2007. ISSN 0176-2680.

NETTO, F. D. et al. Formação de ozônio troposférico: uma revisão da literatura. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA, 25., 2017, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2017. p. 411-428.

NTZIACHRISTOS, L. et al. Emission control options for power two wheelers in Europe. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 24, p. 4547-4561, Aug. 2006. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223100600361X>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ODAKA, M.; KOIKE, N.; SUZUKI, H. Influence of catalyst deactivation on N<sub>2</sub>O emissions from automobiles. **Chemosphere - Global Change Science**, v. 2, n. 3-4, p. 413-423, July 2000. ISSN 1465-9972. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1465997200000428>>. Acesso em: 06 set. 2015.

OH, S. H.; TRIPLETT, T. Reaction pathways and mechanism for ammonia formation and removal over palladium-based three-way catalysts: multiple roles of CO. **Catalysis Today**, v. 231, p. 22-32, Aug. 2014. ISSN 0920-5861. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586113006536>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ORTIZ, R. A. et al. Morbidity costs associated with ambient air pollution exposure in Sao Paulo, Brazil. **Atmospheric Pollution Research**, v. 2, n. 4, p. 520-529, Oct. 2011. ISSN 1309-1042. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104215304797>>. Acesso em 23. nov. 2016.

ORTIZ, R. A.; MOTTA, R. S. da. **PROCONVE Analysis Part III: the economic impact of PROCONVE on air pollution health effects in São Paulo, Brazil: a benefit transfer exercise**. Draft 1, IES - Integrated Environmental Strategies, Project for Brazil, Feb. 2002.

OSTAPIUK, I.; DAEMME, L. C.; PENTEADO, R. **Material particulado em motores Otto de injeção direta**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 527-546.

PAINTER, L. J.; RUTHERFORD, J. A. **Statistical design and analysis methods for the auto/oil air quality research program**. SAE Technical Paper 920319, 1992.

PANDIAN, S.; GOKHALE, S.; GHOSHAL, A. K. Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 3, p. 180-196, May 2009. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920908001521>>. Acesso em: 06 set. 2015.

PARK, S.; RAKHA, H. Environmental impacts of high-emitting vehicles. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2123, p. 97-108, 2009. ISSN 0361-1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/2123-11>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

PASCOAL, E. T. et al. Cooperação e inovação para criação de infraestrutura tecnológica: a participação das empresas do polo automotivo sul fluminense no programa Inovar-Auto. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 592-607.

PASCOAL, E. T.; SILVA, A. L. N. da. O estímulo do Inovar-Auto ao desenvolvimento de materiais ecológicos e veículos mais eficientes: uma reflexão. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 462-470.

PAYRI, F. et al. A challenging future for the IC engine: new technologies and the control role. **Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles**, v. 70, n. 1, p. 15-30, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2516/ogst/2014002>>. Acesso em: 06 set. 2015.

PELKMANS, L.; DEBAL, P. Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 11, n. 4, p. 233-241, July 2006. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920906000253>>. Acesso em: 06 set. 2015.

PENG, C.-Y. et al. Effects of the biodiesel blend fuel on aldehyde emissions from diesel engine exhaust. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 5, p. 906-915, Feb. 2008. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007009065>>. Acesso em: 06 set. 2015.

PENTEADO, R. et al. A study on regulated and unregulated emissions from a set of five gasoline and ethanol fueled motorcycles. In: FISITA 2012 WORLD AUTOMOTIVE CONGRESS, 34., Beijing, 2013. **Proceedings...** Heidelberg: Springer, 2013. v. 189, cap. 53, p. 687-698. (Lecture Notes in Electrical Engineering). ISBN 978-3-642-33840-3.

PENTEADO, R.; DAEMME, L.; MELO, T. **An experimental investigation on regulated and unregulated emissions from four 4-stroke gasoline-powered motorcycle**. SAE Technical Paper 2012-01-1098, 2012.

POPE III, C. A. ; BURNETT, R. T.; THURSTON, G. D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **JAMA**, v. 287, n. 9, p. 1132-1141, Mar. 2002. ISSN 0098-7484. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>>. Acesso em: 06 set. 2015.

POULOPOULOS, S. G.; SAMARAS, D. P.; PHILIPPOPOULOS, C. J. Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels. **Atmospheric environment**, v. 35, n. 26, p. 4399-4406, Sept. 2001. ISSN 1352-2310.

PRIKHODKO, V. Y. et al. Passive SCR for lean gasoline NO<sub>x</sub> control: engine-based strategies to minimize fuel penalty associated with catalytic NH<sub>3</sub> generation. **Catalysis Today**, v. 267, p. 202-209, June 2016. ISSN 0920-5861. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586116300360>>. Acesso em: 06 set. 2015.

RANGEL, M. do C.; CARVALHO, M. F. A. Impacto dos catalisadores automotivos no controle da qualidade do ar. **Química Nova**, v. 26, n. 2, p. 265-277, 2003. ISSN 0100-4042.

REŞİTOĞLU, İ. A.; ALTINIŞIK, K.; KESKIN, A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, n. 1, p. 15-27, Jan. 2015. ISSN 1618-954X.

REYES, F. et al. Technical Note: Analysis of non-regulated vehicular emissions by extractive FTIR spectrometry: tests on a hybrid car in Mexico City. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 12, p. 5339-5346, 2006. ISSN 1680-7316.

RIPPON, B. H. AQIRP and EPEFE: a comparison of the programs and their results. In: SYMPOSIUM ON THE IMPACT OF CLEAN AIR ACT ON FUELS PRODUCTION AND USE, 1996, Orlando. **Proceedings...** V. 41, n. 3, p. 849-853. Disponível em: <[http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/41\\_3\\_ORLANDO\\_08-96\\_0849.pdf](http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/41_3_ORLANDO_08-96_0849.pdf)>. Acesso em 26 nov. 2016.

ROBERTS, J. P.; LOWRY, S. R. **Modal measurements of some important NMOG species by FT-IR Spectroscopy**. SAE Technical Paper 940739, 1994.

ROE, S. M. et al. **Estimating ammonia emissions from anthropogenic nonagricultural sources**. Draft final report prepared for Emission Inventory Improvement Program, US Environmental Protection Agency, Apr. 2004.

SCHÄR, C. M.; ONDER, C. H.; GEERING, H. P. Control of an SCR catalytic converter system for a mobile heavy-duty application. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, v. 14, n. 4, p. 641-653, June 2006. ISSN 1063-6536.

SCHAUER, J. J. et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1-C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 6, p. 1169-1180, 2002. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es0108077>>. Acesso em: 06 set. 2015.



SCHIFTER, I. et al. Fuel formulation and vehicle exhaust emissions in Mexico. **Fuel**, v. 83, n. 14-15, p. 2065-2074, Oct. 2004. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236104001140>>.

SCHMITT, B. Germany's bundesrat resolves end of internal combustion engine. **Forbes**, Oct. 8, 2016. Autos. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/bertelschmitt/2016/10/08/germanys-bundesrat-resolves-end-of-internal-combustion-engine/#3ed4c95131d9>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics**: from air pollution to climate change. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 1118591364.

SHAFIZADEH, K.; NIEMEIER, D.; EISINGER, D. S. **Gross emitting vehicles**: a review of the literature. U. C. Davis Caltrans Air Quality Project, June 2004.

SHAHIR, V. K.; JAWAHAR, C. P.; SURESH, P. R. Comparative study of diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 686-697, May 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001306>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SHELEF, M.; MCCABE, R. W. Twenty-five years after introduction of automotive catalysts: what next? **Catalysis today**, v. 62, n. 1, p. 35-50, 2000. ISSN 0920-5861.

SILEGHEM, L. et al. Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 32, p. 70-85, Oct. 2014. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920914000935>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SILVA, E. R. da; CARDOSO, B. C.; SANTOS, M. P. de S. O aumento da taxa de motorização de motocicletas no Brasil. **Revista Brasileira de Administração Científica**, v. 2, n. 2, p. 49-63, dez. 2011. ISSN 2179-684X.

SILVA, K. C. C. et al. Avaliação da tendência à formação de ozônio dos gases de escapamento de um veículo abastecido com combustíveis contendo diferentes teores de etanol. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014a, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014a. p. 449-461.

SILVA, K. C. C. et al. Emissões de álcool não queimado e poluentes legislados de veículo leve com gasolina A22, A85 e EHR. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014b. p. 381-392.

SILVA, K. C. C. et al. Estudo das emissões de álcool não queimado e aldeídos em veículo Flex analisadas pelas técnicas de Cromatografia e FTIR. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA - SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014c. p. 471-480.

SILVA, K. C. C. et al. **Measurement of legislated emissions, unburned alcohol and potential formation of ozone from a light Flex-Fuel vehicle.** SAE Technical Paper 2014-36-0260, 2014d.

SILVA, P. R. M. et al. Use of proficiency testing schemes for motorcycle exhaust emissions laboratory: Brazilian experience. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 8, n. 3, p. 116-121, May 2014. ISSN 1751-8830.

SILVA, R. A.; VIANA, M. M.; MOHALLEM, N. D. S. Caracterização textural, morfológica e estrutural de catalisadores automotivos novos e usados. **Cerâmica**, v. 55, n. 334, p. 170-176, June 2009.

SO, K. L.; WANG, T. C3–C12 non-methane hydrocarbons in subtropical Hong Kong: spatial–temporal variations, source–receptor relationships and photochemical reactivity. **Science of The Total Environment**, v. 328, n. 1-3, p. 161-174, July 2004. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704000701>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SOUSA, R. B. de et al. A influência do etanol combustível na emissão de etanol, aldeídos e hidrocarbonetos expelidos pelo escapamento em veículos leves. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 353-371.

SOUZA, C. D. R. de et al. Inventory of conventional air pollutants emissions from road transportation for the state of Rio de Janeiro. **Energy Policy**, v. 53, p. 125-135, Feb. 2013. ISSN 0301-4215.

SRINIVASAN, C. A.; SARAVANAN, C. G. Study of combustion characteristics of an SI engine fuelled with ethanol and oxygenated fuel additives. **Journal of sustainable Energy and Environment**, v. 1, p. 85-91, 2010.

STEVEN, H. Worldwide harmonised motorcycle emissions certification procedure. Draft Technical Report UN/ECE-WP 29 – GRPE, WMTC Working Group, Institute for Vehicle Technology, Dec. 2002.

STOVELL, C. et al. **Emissions and fuel economy of a 1998 Toyota with a direct injection spark ignition engine.** SAE Technical Paper 1999-01-1527, 1999.

STRATAS ADVISORS. **Top 100 ranks leaders in reducing gasoline sulfur.** Disponível em: <<https://stratasadvisors.com/Insights/Top-100-Sulfur-Gasoline>>. Acesso em: 28 ago. 2015.



STUMP, F. D.; KNAPP, K. T.; RAY, W. D. Influence of ethanol-blended fuels on the emissions from three pre-1985 light-duty passenger vehicles. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 46, n. 12, p. 1149-1161, Dec. 1996. ISSN 1096-2247. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10473289.1996.10467550>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SUAREZ-BERTOIA, R.; ZARDINI, A. A.; ASTORGA, C. Ammonia exhaust emissions from spark ignition vehicles over the New European driving cycle. **Atmospheric Environment**, v. 97, p. 43-53, Nov. 2014. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014005809>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SUN, K. et al. Vehicle Emissions as an important urban ammonia source in the United States and China. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 4, p. 2472-2481, 2017. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b02805>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SUTTON, M. A. et al. Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 6, p. 855-869, Jan. 2000. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099003623>>. Acesso em: 06 set. 2015.

SZWARC, A. et al. Medição da emissão de aldeídos e álcool não queimado em motocicletas operando nos ciclos WMTC E ECE R40. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2014, 22., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014b. p. 224-234.

SZWARCFITER, L.; MENDES, F. E.; LA ROVERE, E. L. Enhancing the effects of the Brazilian program to reduce atmospheric pollutant emissions from vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 10, n. 2, p. 153-160, Mar. 2005. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920904000902>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TAKESHITA, E. V. et al. Influence of solvent addition on the physicochemical properties of Brazilian gasoline. **Fuel**, v. 87, n. 10–11, p. 2168-2177, Aug. 2008. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236107004954>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TAKEUCHI, M.; MATSUMOTO, S. NO<sub>x</sub> storage-reduction catalysts for gasoline engines. **Topics in catalysis**, v. 28, n. 1, p. 151-156, Apr. 2004. ISSN 1022-5528.

TAN, P.-Q.; HU, Z.-Y.; LOU, D.-M. Regulated and unregulated emissions from a light-duty diesel engine with different sulfur content fuels. **Fuel**, v. 88, n. 6, p. 1086-1091, June 2009. ISSN 0016-2361. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236108004870>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TANG, J. H. et al. Characteristics and diurnal variations of NMHCs at urban, suburban, and rural sites in the Pearl River Delta and a remote site in South China.

**Atmospheric Environment**, v. 41, n. 38, p. 8620-8632, Dec. 2007. ISSN 1352-2310. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007006504>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TANNER, R. L. et al. Atmospheric chemistry of aldehydes: enhanced peroxyacetyl nitrate formation from ethanol-fueled vehicular emissions. **Environmental Science & Technology**, v. 22, n. 9, p. 1026-1034, Sept. 1988. ISSN 0013-936X.

TEIXEIRA, E. C. et al. Measurement of surface ozone and its precursors in an urban area in South Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 13, p. 2213-2220, Apr. 2009. ISSN 1352-2310. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008011497>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TIMONEN, H. et al. Influence of fuel ethanol content on primary emissions and secondary aerosol formation potential for a modern flex-fuel gasoline vehicle. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 17, n. 8, p. 5311-5329, Apr. 2017. ISSN 1680-7324. Disponível em: <<http://www.atmos-chem-phys.net/17/5311/2017/>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TORRES, D. A.; REDÍGOLO, M. M.; FLORES, A. Correlação de dados de análise de emissão veicular entre analisador FT-IR e método tradicional para medição de análise modal. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2013, 21., 2014, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2014. p. 762-771.

TSAI, J.-H. et al. Air pollutant emission factors from new and in-use motorcycles. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 28, p. 4747-4754, 2000. ISSN 1352-2310.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231000002703>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TSAI, J.-H.; HUANG, P.-H.; CHIANG, H.-L. Air pollutants and toxic emissions of various mileage motorcycles for ECE driving cycles. **Atmospheric Environment**, v. 153, p. 126-134, Mar. 2017. ISSN 1352-2310. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231017300195>>. Acesso em: 06 set. 2015.

TSUDA, H.; ITO, T.; NAKAMURA, K. **Japan Clean Air Program (JCAP): program objectives and design**. SAE Technical Paper 1999-01-1481, 1999.

TSUMAGARI, I. et al. **Study of 2-LEG NO<sub>x</sub> storage-reduction catalyst system for HD diesel engine**. SAE Technical Paper 2006-01-0211, 2006.

TWIGG, M. V. Catalytic control of emissions from cars. **Catalysis Today**, v. 163, n. 1, p. 33-41, Apr. 2011. ISSN 0920-5861.

UN - United Nations. **Global technical regulation No. 2**. Measurement procedure for two wheeled motorcycles equipped with a positive or compression ignition engine with regard to the emissions of gaseous pollutants, CO<sub>2</sub> emissions and fuel consumption: ECE/TRANS/180/Add2. 2005. Disponível em: <[https://digitallibrary.un.org/record/556118/files/%5BE\\_%5DECE\\_TRANS\\_180\\_Add.2-EN.pdf](https://digitallibrary.un.org/record/556118/files/%5BE_%5DECE_TRANS_180_Add.2-EN.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2015.

UNEP - United Nations Environment Programme. Diesel Fuel Sulphur Levels: Global Status. March 2017. Disponível em: <[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17543/MapWorldSulphur\\_March2017.pdf?sequence=1&isAllowed=>](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17543/MapWorldSulphur_March2017.pdf?sequence=1&isAllowed=>)>. Acesso em: 26 jun. 2017.

VAN SETTEN, B. A. A. L.; MAKKEE, M.; MOULIJN, J. A. Science and technology of catalytic diesel particulate filters. **Catalysis Reviews**, v. 43, n. 4, p. 489-564, 2001. ISSN 0161-4940.

VICENTINI, P. C. **Uso de modelos de qualidade do ar para avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 e 2020 na região metropolitana do Rio de Janeiro**. 224 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica) - PEM/COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

VILAR, L. H. C. et al. Estudo das emissões de material particulado em veículo leve com motor ciclo Otto de injeção direta Flex Fuel. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2015, 23., 2015, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2015. p. 208-221.

VILELLA, A. C. S. et al. Efeitos do E27,5 em veículos, motocicletas e motor a gasolina. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA – SIMEA 2015, 23., 2015, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Blucher, 2015. p. 449-468.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: UFPR, 2001. ISBN 8573350644.

VOLKS admite que adaptou 11 milhões de carros para esconder poluição. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 22 set. 2015. Caderno Mercado. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/09/1684813-volkswagen-cortara-meta-de-lucro-e-separa-65-bi-de-euros-para-escandalo.shtml>>. Acesso em: 25 set. 2015.

WALLINGTON, T. J.; WIESEN, P. N<sub>2</sub>O emissions from global transportation. **Atmospheric Environment**, v. 94, p. 258-263, Sept. 2014. ISSN 1352-2310.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014003653>>. Acesso em: 06 set. 2015.

WALSH, M. P. PM<sub>2.5</sub>: global progress in controlling the motor vehicle contribution. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-17, Feb. 2014. ISSN 2095-2201.

WANG, J. et al. A non-NH<sub>3</sub> pathway for NO<sub>x</sub> conversion in coupled LNT-SCR systems. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 111, p. 562-570, Jan. 2012. ISSN 0926-3373.

WEISS, R. F.; CRAIG, H. Production of atmospheric nitrous oxide by combustion. **Geophysical Research Letters**, v. 3, n. 12, p. 751-753, Dec. 1976. ISSN 1944-8007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/GL003i012p00751>>. Acesso em: 06 set. 2015.

WESTERHOLM, R. N. et al. Effect of fuel polycyclic aromatic hydrocarbon content on the emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons and other mutagenic substances from a gasoline-fueled automobile. **Environmental Science & Technology**, v. 22, n. 8, p. 925-930, Aug. 1988. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es00173a010>>. Acesso em: 06 set. 2015.

WHITTINGTON, B. I.; JIANG, C. J.; TRIMM, D. L. Vehicle exhaust catalysis: I. The relative importance of catalytic oxidation, steam reforming and water-gas shift reactions. **Catalysis Today**, v. 26, n. 1, p. 41-45, Aug. 1995. ISSN 0920-5861. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092058619500093U>>. Acesso em: 06 set. 2015.

WHO - World Health Organization. **IARC**: outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Press Release, n. 221, 13 Oct. 2013.

WHO - World Health Organization. **WHO releases country estimates on air pollution exposure and health impact**. Disponível em: <<http://www.who.int/en/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

WIERS, W. W.; SCHEFFLER, C. E. **Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) tracer technique for modal mass exhaust emission measurement**. SAE Technical Paper 720126, 1972.

WILLIAMS, R. L.; LIPARI, F.; POTTER, R. A. Formaldehyde, methanol and hydrocarbon emissions from methanol-fueled cars. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 40, n. 5, p. 747-756, 1990. ISSN 1047-3289.

WITZE, P. O.; GREEN, R. M. **LIF and flame-emission imaging of liquid fuel films and pool fires in an SI engine during a simulated cold start**. SAE Technical Paper 970866, 1997.

WU, H.-C. et al. **Emission control technologies for 50 and 125 cc motorcycles in Taiwan**. SAE Technical Paper 980938, 1998.

XU, L.; MCCABE, R. W. LNT+ in situ SCR catalyst system for diesel emissions control. **Catalysis Today**, v. 184, n. 1, p. 83-94, Apr. 2012. ISSN 0920-5861.

XUE, H.; JIANG, S.; LIANG, B. A Study on the model of traffic flow and vehicle exhaust emission. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, p. 6, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/736285>>. Acesso em: 06 set. 2015.

XUE, J.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, p. 1098-1116, Feb. 2011. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003850>>. Acesso em: 06 set. 2015.

YANG, H.-H. et al. Effects of ethanol-blended gasoline on emissions of regulated air pollutants and carbonyls from motorcycles. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 281-286, Jan. 2012. ISSN 0306-2619.

YAO, Y.-C.; TSAI, J.-H.; CHIANG, H.-L. Effects of ethanol-blended gasoline on air pollutant emissions from motorcycle. **Science of the total environment**, v. 407, n. 19, p. 5257-5262, Sept. 2009. ISSN 0048-9697.

YOSHIKAWA, Y. et al. Roadside air quality simulation model in Japan Clean Air Program. In: JOINT CONFERENCE ON THE APPLICATIONS OF AIR POLLUTION METEOROLOGY WITH THE A&WMA, 15., 2008. **Proceedings...** Disponível em: <<https://ams.confex.com/ams/88Annual/webprogram/15AIRPOL.html>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ZACHARIADIS, T.; NTZIACHRISTOS, L.; SAMARAS, Z. The effect of age and technological change on motor vehicle emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 6, n. 3, p. 221-227, May 2001. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920900000250>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ZACHARIADIS, T.; SAMARAS, Z.; ZIEROCK, K.-H. Dynamic modeling of vehicle populations: an engineering approach for emissions calculations. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 50, n. 2, p. 135-149, Oct. 1995. ISSN 0040-1625. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004016259500057H>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ZÁRANTE, P. H. B.; SODRÉ, J. R. Evaluating carbon emissions reduction by use of natural gas as engine fuel. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 1, n. 6, p. 216-220, Dec. 2009. ISSN 1875-5100.

ZEMROCH, P. et al. **European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies (EPEFE)**: statistical design and analysis techniques. SAE Technical Paper 961069, 1996.

ZHANG, Z. H. et al. Experimental investigation of regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with Euro V diesel fuel and fumigation methanol. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 8, p. 1054-1061, Mar. 2010. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009010516>>. Acesso em: 06 set. 2015.

ZHAO, F. F. **Technologies for near-zero-emission gasoline-powered vehicles**. SAE International, 2007.

ZHENG, M.; READER, G. T.; HAWLEY, J. G. Diesel engine exhaust gas recirculation: a review on advanced and novel concepts. **Energy conversion and management**, v. 45, n. 6, p. 883-900, Apr. 2004. ISSN 0196-8904.



## APÊNDICE 1 – DETALHAMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO POR VEÍCULOS AUTOMORES NO BRASIL

O PROCONVE/PROMOT classificou os veículos automotores em quatro categorias:

- Veículos leves de passageiros
- Veículos comerciais leves
- Veículos pesados
- Motociclos e ciclomotores.

De acordo com essa divisão, foram estabelecidos os limites de emissões a serem cumpridos.

### A) Classificação dos veículos Leves

- Veículo leve de passageiro (automóvel): é o veículo automotor com massa total máxima de 3.856 kg e massa do veículo em ordem de marcha de até 2.720 kg, projetado para o transporte de até 12 passageiros, ou seus derivados para o transporte de carga.
- Veículo leve comercial (utilitários): é o veículo automotor não derivado de veículo leve de passageiro com massa total máxima de 3.856 kg e massa do veículo em ordem de marcha de até 2.720 kg, projetado para o transporte de carga, ou misto ou seus derivados, ou projetado para o transporte de mais de 12 passageiros, ou ainda com características especiais para uso fora de estrada.

O controle de emissão desses veículos foi escalonado nas seguintes etapas, denominadas de fases L:

- **Fase L-1 (1988 a 1991):**

Implantada pela mesma resolução que criou o PROCONVE (Resolução CONAMA nº 18, de 6.5.1986). Foi caracterizada pela eliminação dos modelos mais poluentes e aprimoramento dos modelos, com redução nas tolerâncias de produção, porém sem grandes saltos na tecnologia veicular. Iniciou-se nessa fase também o controle da emissão evaporativa.

As principais inovações tecnológicas que ocorreram nesta fase foram: reciclagem dos gases de escapamento para controle das emissões de NO<sub>x</sub>; injeção secundária do ar no coletor de exaustão para o controle de CO e HC; implantação de amortecedor da borboleta do carburador para controle do HC e a otimização do avanço da ignição (IBAMA, 2011; VICENTINI, 2011; MMA, 2013). A TABELA 26 apresenta os limites dessa fase.

TABELA 26 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS DO CICLO OTTO NOVOS DA FASE L1

Período de vigência	Limites de emissão (g km <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>			Emissão evaporativa <sup>2</sup> (g/teste)	CO em marcha lenta (% V)
	CO	THC	NO <sub>x</sub>		
1988/91	24,0	2,1	2,0	6,0	3,0

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Medições conforme NBR 6601; <sup>2</sup> – medição conforme NBR 11481.

- **Fase L-2 (1992 a 1996):**

Passam a vigorar novos limites de emissão, também estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 18, de 6.5.1986. Essa fase foi caracterizada pelo desenvolvimento e introdução de novas tecnologias, em especial a injeção eletrônica monoponto de combustível ou uso de carburadores assistidos eletronicamente e os primeiros conversores catalíticos para uso com mistura de etanol, em proporção única no mundo. A resolução CONAMA 08/93 determinou os limites de durabilidade, período em que o veículo deve atender os limites de emissões, fixado em 80.000 km para os veículos leves de passageiros e 160.000 km para os veículos pesados, ou cinco anos de uso. Em 1994 iniciou-se o controle de ruído dos veículos (IBAMA, 2011; VICENTINI, 2011; MMA, 2013). Os limites da fase L2 são apresentados na TABELA 27.

TABELA 27 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS NOVOS DA FASE L2

Período de vigência	Limites de emissão (g km <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>					Emissão evaporativa (g/teste) <sup>2</sup>	CO em marcha lenta (% V)
	CO	THC	NO <sub>x</sub>	RCHO	MP		
1992/96 <sup>3</sup>	24,0	2,1	2,0	0,15	-	6,0	3,0
1992/96	12,0	1,2	1,4	0,15	-	6,0	2,5
Mar/94 <sup>4</sup>	12,0	1,2	1,4	-	0,05	-	-

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Medições conforme NBR 6601; <sup>2</sup> – medição conforme NBR 11481; <sup>3</sup> – veículos leves não derivados de automóveis; <sup>4</sup> – previstos limites emissões para veículos leves ciclo Diesel (Resolução CONAMA 08/93).

- **Fase L-3 (1997 a 2004):**

Essa fase se caracteriza por limites mais restritivos, também estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 18, de 6.5.1986, complementada pela resolução CONAMA 15 de 1995. Essa fase equivale ao Tier 0 da EPA. Para atendê-los, a indústria introduziu tecnologias para formação de mistura e controle eletrônico do motor, destacando-se a injeção multiponto, catalisadores mais eficientes e o sensor de oxigênio na descarga (sonda lambda) (IBAMA, 2011; VICENTINI, 2011; MMA, 2013). A TABELA 28 apresenta o resumo dos limites dessa fase.

TABELA 28 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L3

Período de vigência	Limites de emissão (g km <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>					Emissão evaporativa (g/teste) <sup>4</sup>	CO em marcha lenta (% V) <sup>5</sup>
	CO	THC	NO <sub>x</sub>	RCHO <sup>2</sup>	MP <sup>3</sup>		
1997/04	2,0	0,30	0,60	0,03	0,05	6,0	0,5
1998/03 <sup>6</sup>	2,0	0,30	0,60	0,03	0,05	6,0	0,5
1998/03 <sup>7</sup>	6,2	0,50	1,40	0,06	0,16	6,0	0,5
2003/04 <sup>8</sup>	2,0	0,30	0,60	0,03	0,05	2,0	0,5
2003/04 <sup>7</sup>	6,2	0,50	1,40	0,06	0,16	2,0	0,5

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Medições conforme NBR 6601; <sup>2</sup> – Aldeído aplicável somente a veículos Otto; <sup>3</sup> – Material particulado aplicável a veículos Diesel; <sup>4</sup> – Emissão evaporativa aplicável a veículo Otto; <sup>5</sup> – Aplicável a veículos Otto; <sup>6</sup> – Veículo comercial leve com massa para ensaio ≤1.700 kg; <sup>7</sup> – Veículo comercial leve com massa para ensaio > 1.700 kg; <sup>8</sup> – Veículos leves e comerciais leves com massa para ensaio ≤1.700 kg.



- **Fase L-4 (2005 a 2008):**

Novos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 315 de 29.10.2002, equivalentes ao Tier 1 da EPA, entram em vigor paulatinamente no período: 40% dos veículos novos deveriam atendê-los em 2005, 80% em 2006 e 100% em 2007.

A prioridade nas fases L4 e L5 é a redução das emissões de HC e NO<sub>x</sub>, por serem compostos precursores de ozônio. Sendo adotado a partir dessa fase o limite de NMHC, hidrocarbonetos do tipo não metano, em substituição ao THC. As inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica. Nessa fase teve início a implantação do sistema de autodiagnose (OBD) para os veículos leves de passageiros, objetivando a detecção de falhas que afetem o controle das emissões (IBAMA, 2011; VICENTINI, 2011; MMA, 2013). Na TABELA 29 estão descritos os limites de emissão da fase L4.

TABELA 29 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L4

Período de vigência	Limites de emissão (g km <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>						Emissão evaporativa (g/teste) <sup>4</sup>	CO em marcha lenta (% V) <sup>5</sup>
	CO	THC <sup>6</sup>	NMHC	NO <sub>x</sub>	RCHO <sup>2</sup>	MP <sup>3</sup>		
Jan/2005 (40%) <sup>9</sup>	2,0	0,30	0,16	0,25 <sup>7</sup>	0,03	0,05	2,0	0,5
Jan/2006 (70%) <sup>9</sup>				ou				
Jan/2007 (100%) <sup>9</sup>				0,60 <sup>8</sup>				
Jan/2005 (40%) <sup>10</sup>	2,7	0,50	0,20	0,43 <sup>7</sup>	0,06	0,10	2,0	0,5
Jan/2006 (70%) <sup>10</sup>				ou				
Jan/2007 (100%) <sup>10</sup>				1,00 <sup>8</sup>				

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Medições conforme NBR 6601; <sup>2</sup> – Aldeídos aplicáveis somente a veículos Otto (NBR 12026); <sup>3</sup> – Material particulado aplicável a veículo Diesel; <sup>4</sup> – Emissão evaporativa aplicável a veículo Otto, exceto GNV; <sup>5</sup> – Aplicável a veículos Otto; <sup>6</sup> – Aplicável somente a veículos GNV; <sup>7</sup> – Aplicável a veículo Otto; <sup>8</sup> – Aplicável a veículo Diesel; <sup>9</sup> – Veículos leves e comerciais leves com massa para ensaio ≤ 1.700 kg; <sup>10</sup> – Veículo comercial leve com massa para ensaio > 1.700 kg.

- **Fase L-5 (2009):**

Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 315, de 29.10.2002. Correspondentes aos da legislação norte-americana Tier 2-Bin 9. Da mesma forma que na fase L4, a prioridade na fase L5 é a redução das emissões de HC e NO<sub>x</sub>. As inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica. A segunda fase de implementação do sistema OBD ocorreu a partir do ano de 2010. Nesta fase deu-se a redução de 31% das emissões de hidrocarbonetos do tipo não metano para os veículos leves do ciclo Otto e de 48% e 42% para as emissões de NO<sub>x</sub> para os veículos leves do ciclo Otto e Diesel, respectivamente. Além disso, as emissões de aldeídos foram reduzidas em, aproximadamente, 67% para os veículos do ciclo Otto.

Para os veículos comerciais leves do ciclo Diesel essa fase não foi implementada em janeiro de 2009 devido à indisponibilidade de combustível com baixo teor de enxofre, de tempo para o desenvolvimento e de logística da distribuição desse combustível e da ureia (ARLA32) utilizada nos veículos com tecnologia SCR para redução de NO<sub>x</sub>. Com isso ocorreu a antecipação da aplicação

dos limites da fase L6 para o ano de 2012 (IBAMA, 2011; VICENTINI, 2011; MMA, 2013). Os limites da fase L5 são apresentados na TABELA 30.

TABELA 30 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L5

Período de vigência	Limites de emissão (g km <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>						Emissão evaporativa (g/teste) <sup>4</sup>	CO em marcha lenta (% V) <sup>5</sup>
	CO	THC <sup>6</sup>	NMHC	NO <sub>x</sub>	RCHO <sup>2</sup>	MP <sup>3</sup>		
Jan/2009 (veículos leves e comerciais leves) <sup>9</sup>	2,0	0,30	0,05	0,12 <sup>7</sup> ou 0,25 <sup>8</sup>	0,02	0,05	2,0	0,5
Jan/2009 (veículos comerciais leves) <sup>10</sup>	2,7	0,50	0,06	0,25 <sup>7</sup> ou 0,43 <sup>8</sup>	0,04	0,06	2,0	0,5

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Medições conforme NBR 6601; <sup>2</sup> – Aldeídos aplicáveis somente a veículos Otto (NBR 12026); <sup>3</sup> - Material particulado aplicável a veículo Diesel; <sup>4</sup> - Emissão evaporativa aplicável a veículo Otto, exceto GNV; <sup>5</sup> – Aplicável a veículos Otto; <sup>6</sup> – Aplicável somente a veículos GNV; <sup>7</sup> – Aplicável a veículo Otto; <sup>8</sup> – Aplicável a veículo Diesel; <sup>9</sup> – Veículos leves e comerciais leves com massa para ensaio ≤1.700 kg; <sup>10</sup> - Veículos comercial leve com massa para ensaio > 1.700 kg.

#### • Fase L-6 (2012):

Os novos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 415, de 24.09.2009 não têm correspondência direta com nenhuma categoria Bin da legislação Tier 2 da EPA. Devido aos problemas na implementação da fase L5 para os veículos do ciclo Diesel, a fase L6 foi antecipada para essa categoria, entrando em vigor em janeiro de 2012.

A fase L6 determinou reduções de 67% e 65% nas emissões de CO e NO<sub>x</sub>, respectivamente, além de melhorias na qualidade dos combustíveis. A Resolução ANP nº 38 de 9.12.2009 estabeleceu as especificações da gasolina disponível para comercialização a partir de janeiro de 2014. Sua principal característica foi a redução do teor máximo de enxofre de 800 ppmv para 50 ppmv, propiciando uma maior eficiência dos catalisadores automotivos. A principal inovação tecnológica prevista nessa fase é a utilização de dispositivos/sistemas para autodiagnose (OBD), obrigatória para veículos automotores leves do ciclo Diesel, a partir de 1º de janeiro de 2015. Ainda, foi previsto que os fabricantes de veículos diesel devem informar ao IBAMA valores típicos das emissões de aldeídos durante o ciclo de emissões e também valores típicos de emissão de NO<sub>x</sub> em ciclo estrada, conforme NBR 7024, e veículos equipados com EGR devem comprovar seu funcionamento até 1.000 m de altitude (IBAMA, 2011; VICENTINI, 2011; MMA, 2013). A TABELA 31 sumariza os limites da fase L6.

TABELA 31 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E COMERCIAIS LEVES NOVOS DA FASE L6

Período de vigência	Limites de emissão (g km <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>						Emissão evaporativa (g/teste) <sup>4</sup>	CO em marcha lenta (% V) <sup>5</sup>
	CO	THC <sup>6</sup>	NMHC	NO <sub>x</sub>	RCHO <sup>2</sup>	MP <sup>3</sup>		
Jan/2012 <sup>9</sup>	1,3	0,30	0,05	0,08	0,02	0,025	1,5	0,2
Jan/2014 <sup>10</sup>								
Jan/2015 <sup>11</sup>								
Jan/2012 <sup>12</sup>	2,0	0,50	0,06	0,25 <sup>7</sup>	0,03	0,040	1,5	0,2
Jan/2014 <sup>13</sup>				ou				
Jan/2015 <sup>14</sup>				0,35 <sup>8</sup>				

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Medições conforme NBR 6601; <sup>2</sup> – Aldeídos aplicáveis somente a veículos Otto (NBR 12026); <sup>3</sup> – Material particulado aplicável a veículo Diesel; <sup>4</sup> – Emissão evaporativa aplicável a veículo Otto, exceto GNV; <sup>5</sup> – Aplicável a veículos Otto; <sup>6</sup> – Aplicável somente a veículos GNV; <sup>7</sup> – Aplicável a veículo Otto; <sup>8</sup> – Aplicável a veículo Diesel; <sup>9</sup> – Veículos comerciais leves do ciclo Diesel com massa para ensaio ≤1.700 kg; <sup>10</sup> – Aplicável para novos modelos de veículos leves de passageiros e comerciais leves com massa para ensaio ≤1.700 kg do ciclo Otto; <sup>11</sup> – Aplicável para todos os modelos de veículos leves de passageiros e comerciais leves com massa para ensaio ≤1.700 kg do ciclo Otto; <sup>12</sup> – Veículos comerciais leves do ciclo Diesel com massa para ensaio >1.700 kg; <sup>13</sup> – Aplicável para novos modelos de veículos leves de passageiros e comerciais leves com massa para ensaio >1.700 kg do ciclo Otto; <sup>14</sup> – Aplicável para todos os modelos de veículos leves de passageiros e comerciais leves com massa para ensaio >1.700 kg do ciclo Otto.

#### • Fase L-7:

Em discussão no âmbito do CONAMA, sendo que ainda não estão definidos os limites de emissões, nem a data para sua implantação.

Obs.: Veículos com *kit* GNV: foi estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 291/01 de 25/04/02 e pela Instrução Normativa do IBAMA Nº 15/02 que os veículos adaptados ao uso de GNV não devem superar as emissões que produzem com o combustível original de fábrica (MMA, 2013).

### B) Veículos pesados (ônibus e caminhões)

É o veículo automotor para o transporte de passageiros e/ou carga, com massa total máxima maior que 3.856 kg ou massa do veículo em ordem de marcha maior que 2.720 kg, projetado para o transporte de passageiros e/ou carga.

O controle de fumaça ou, indiretamente, de material particulado teve seu início em 1987, com o estabelecimento do limite de opacidade “k > 2,5” ao longo de toda a curva de máximo toque dos motores a diesel.

#### • Fases P-1 e P-2 (1990-1993):

São estabelecidos limites pela Resolução CONAMA nº 8 de 31.08.1993. Nesse período, os limites para emissão gasosa (fase P1) e material particulado (fase P2), por ser uma fase inicial de regulação, não foram exigidos legalmente.

#### • Fase P-3 (1994-1997):

Novos limites equivalentes à fase europeia Euro I, estabelecidos pela mesma Resolução CONAMA nº 8 de 31.08.1993. Nessa fase iniciou-se também o controle de ruído.

Os desenvolvimentos de novos modelos de motores visaram à redução do consumo de combustível, aumento da potência e redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) por meio da adoção de *intercooler* e motores turbo. Nesta fase se deu uma redução drástica das emissões de CO (43%) e HC (50%).

- **Fase P-4 (1998-2002):**

Entram em vigor novos limites, também estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 8 de 31.08.1993, que tem correspondência com a fase Euro II. Eles são confirmados pela Resolução CONAMA nº 226 de 20.08.1997 (IBAMA, 2011; MMA, 2013). A TABELA 32 apresenta os limites e cronograma de implantação das fases P-1 a P-4.

TABELA 32 – LIMITES DE EMISSÃO PARA AS FASES P-1 A P-4

Fase	Período de vigência	Aplicação	Limites de emissão (g KWh <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>				
			CO	THC	NO <sub>x</sub>	MP	K <sup>2</sup>
P-1	1990	Todos os veículos Diesel	-	-	-	-	2,5
P-2	Mar/94	20% ônibus urbanos, 80% outros veículos nacionais Diesel	11,2	2,45	14,4	-	2,5
	Jan/96	20% veículos nacionais					
P-3	Jan/94	100% veículos importados	4,9	1,23	9,0	0,70 ou 0,40 <sup>3</sup>	2,5
	Mar/94	80% ônibus urbanos nacionais					
	Jan/96	80% pesados nacionais e 100% comerciais leves					-
	Jan/96	20% dos ônibus urbanos nacionais					
	Jan/00	20% veículos nacionais					
P-4	Jan/98	80% ônibus urbanos nacionais e todos os veículos importados	4,0	1,10	7,0	0,25 ou 0,15 <sup>4</sup>	-
	Jan/00	80% veículos pesados nacionais e 100% comerciais leves					
	Jan/02	Todos os veículos					

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – Ensaio de acordo com as Normas MB-3295 e NBR 10813 (ECE-E-49); <sup>2</sup> – aplicável a motores do ciclo Diesel; <sup>3</sup> - 0,7 g KWh<sup>-1</sup> para motores com potência até 85 kW e 0,4 g KWh<sup>-1</sup> para motores de potência superior a 85 Kw – aplicável aos veículos Diesel.; <sup>4</sup> - 0,25 g/kWh para motores até 0,7 dm<sup>3</sup>/cilindro com rotação máxima acima de 3000 RPM e 0,15 g KWh<sup>-1</sup> para os demais – aplicável aos veículos Diesel.

Obs.: A resolução CONAMA 08/93 permitiu que motores que equipavam veículos comerciais leves fossem homologados em teste de dinamômetro de bancada, situação alterada em 2012.

- **Fase P-5 (2003-2008):**

Passam a valer os novos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 315, de 29.10.2002, equivalentes ao Euro III. Teve como objetivo a redução de emissões de material particulado, NO<sub>x</sub> e HC. Devido à não implantação da fase P-6, essa fase se estendeu até 2011.

- **Fase P-6 (2009):**

Assim como a fase P5, a fase P6, estabelecida pela Resolução CONAMA nº 315/2002, teria como objetivo principal a redução de emissões de material particulado, NO<sub>x</sub> e HC. Como nos veículos comerciais leves do ciclo Diesel (fase L5)

os limites P-6, equivalentes ao Euro IV, não foram implementados. O motivo foi o atraso na especificação e fornecimento do combustível S50, necessário para atender às tecnologias da nova fase. Um acordo judicial envolvendo Petrobras, montadoras, ANP e Ministério Público estabelece um cronograma para a distribuição do diesel S50 no país e antecipa a fase P-7 para 2012, como forma de compensação.

- **Fase P-7 (2012):**

Entram em vigor os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 403, de 11.11.2008, que são equivalentes aos do Euro V. A Resolução ANP nº 31 de 14.10.2009 estabelece as especificações do óleo diesel destinado aos veículos a serem homologados para a fase P-7, disponível para comercialização a partir de janeiro de 2013. Trata-se do diesel S10, cuja concentração máxima de enxofre não pode exceder 10 ppmv. Além de reduzir o limite para emissão de  $\text{NO}_x$ , a fase P7 estabeleceu a obrigatoriedade de incorporação de dispositivos ou sistemas para autodiagnose (OBD). Em termos de novas tecnologias para redução das emissões, destaca-se a recirculação dos gases de escape (EGR) associado ao filtro de partículas (DPF) e o catalisador de redução seletiva (SCR), que utiliza ARLA 32, um insumo à base de ureia, sendo capaz de reduzir a emissão de  $\text{NO}_x$ . Na TABELA 33 estão apresentados os limites para as fases P-5, P-6 e P-7.

TABELA 33 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS PESADOS, FASES P-5, P-6 E P-7

Fase	Período de vigência	Aplicação	Limites de emissão ( $\text{g KWh}^{-1}$ )				
			CO	THC	$\text{NO}_x$	MP	K <sup>1</sup>
P-5	Jan/04	Veículos pesados convencionais e c/ pós-tratamento; com. leves (ciclo de ensaios ESC/ELR) <sup>5</sup>	2,1	0,66	5,0	0,10 ou 0,13 <sup>2</sup>	0,80 <sup>4</sup>
	Jan/05 <sup>3</sup>	Veículos pesados c/ pós-tratamento e comerciais leves (ciclo de ensaios ESC/ELR + ETC) <sup>6</sup>	5,45	0,78	5,0	0,16 ou 0,21 <sup>2</sup>	-
P-6	Jan/09	Veículos pesados (ciclo de ensaios ESC/ELR)	1,5	0,46	3,5	0,02	0,50 <sup>4</sup>
		Veículos pesados (ciclo de ensaios ESC/ELR + ETC)	4,0	0,55 <sup>7</sup>	3,5	0,03	-
P-7	Jan/12	Veículos pesados (ciclo de ensaios ESC/ELR)	1,5	0,46	2,0	0,02	0,50 <sup>4</sup>
		Veículos pesados (ciclo de ensaios ESC/ELR + ETC)	4,0	0,55 <sup>7</sup>	2,0	0,03	-

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTAS: <sup>1</sup> – aplicável a motores do ciclo Diesel; <sup>2</sup> – Aplicável somente a motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> e rotação à potência nominal superior a 3000 m<sup>-1</sup>; <sup>3</sup> – inicia alternativamente em 2004 com 100% dos ônibus urbanos e em 2005 com 40% dos outros veículos da produção ou em 2004 com 60% dos ônibus urbanos e em 2005 com 60% dos outros veículos da produção; em 2005 - > 100% dos micro-ônibus e novos lançamentos; a partir de 2007 -> 100% dos veículos comercializados; <sup>4</sup> – opacidade ELR (m<sup>-1</sup>), <sup>5</sup> – ESC- ciclo Europeu em Regime Constante/ELR- Ciclo Europeu de Resposta em Carga; <sup>6</sup> – ETC- Ciclo Europeu em Regime Transiente; <sup>7</sup> – Limite referente a NMHC.

### C) Veículo de Duas Rodas e Assemelhados (Motociclos e Ciclomotores)

A classificação para esses veículos é dada pela capacidade volumétrica do motor e velocidade, sendo que os ciclomotores possuem motor de até 50 cm<sup>3</sup> e velocidade máxima de 50 km h<sup>-1</sup>. Os demais são classificados como motociclos.

Para essas classes o controle ambiental teve início pelos níveis de emissão de ruído, que começa em 1994.

- **Fase M-1 (2003):**

Começam a vigorar os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 297/02, que criou o PROMOT.

- **Fase M-2 (2005):**

Limites mais restritivos e equivalentes aos do Euro II começam a vigorar para os novos modelos e, a partir de 2006, para todos os motocicletas.

- **Fase M-3 (2009):**

Os limites impostos equiparam-se aos praticados na Europa (Euro III). Pela restrição dos mesmos, as montadoras se veem obrigadas a introduzir o uso de sistemas de pós-tratamento (catalisadores) e, para alguns modelos, o uso de injeção eletrônica nas motocicletas (IBAMA, 2011; MMA, 2013). A TABELA 34 apresenta os limites para as fases M1, M2 e M3.

TABELA 34 – LIMITES DE EMISSÃO PARA CICLOMOTORES, MOTOCICLOS E SIMILARES

Veículos	Fase	Cilindrada	CO (g/km)	THC + NOx (g/km)	THC (g/km)	NOx (g/km)	CO (%) marcha lenta
Ciclomotores	Fase 1 - 2003	-	6,0	3,0	-	-	-
	Fase 2 - 2005	-	1,0	1,2	-	-	-
Motociclos e Similares	Fase 1 - 2003	≤ 250 cc	13,0	-	3,0	0,3	6,0
		> 250 cc	-	-	-	-	4,5
	Fase 2 - 2006	< 150 cc	5,5	-	1,2	0,3	-
		≥ 150 cc	-	-	1,0	-	-
	Fase 3 - 2009	< 150 cc	2,0	-	0,8	0,15	-
		≥ 150 cc	-	-	0,3	-	-

FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

- **Fase M-4 (2014):**

As resoluções CONAMA 432 de 13/07/11 e 456 de 29/04/13, que regulamentaram os limites de emissões para os motocicletas e ciclomotores, trouxeram mudanças e evolução ao programa. A primeira mudança foi no protocolo de ensaios: a partir de 2014 passou-se a adotar o ciclo WMTC para os ensaios de emissões nas homologações de novos modelos, ciclo mais realista na simulação das condições reais de uso desses veículos (FAVRE et al., 2009). Ainda, foram implantados limites para as emissões evaporativas, necessidade de determinar fatores de deterioração das emissões e o controle de produção. O fator de deterioração tem por objetivo verificar a influência do desgaste dos veículos nas emissões. Para os ciclomotores o acúmulo de rodagem deve ser de 10.000 km, com execução de ensaios de emissões nos intervalos de manutenção. Para os veículos com velocidades de até 130 km h<sup>-1</sup> o acúmulo de rodagem é de 18.000km e para os motocicletas com velocidade maior que 130 km h<sup>-1</sup> a necessidade de rodagem é de 30.000 km. O fator deve ser determinado para motocicletas com vendas anuais superiores a 10.000 unidades; para modelos com vendas inferiores deve ser aplicado fator de 20% para degradação das emissões, sendo facultada ao fabricante a sua determinação.



Os ensaios de controle de produção se tornaram obrigatórios a partir do segundo semestre de 2011, com a necessidade de executar a emissão semestral de Relatório de Valores de Emissão da Produção – RVEP, aplicável a modelos e extensões com produção semestral acima de 1.000 unidades. Sendo efetuados ensaios em três amostras da produção, a média das emissões deve ser inferior aos limites da fase a que pertençam para validar a produção (BRASIL, 2011).

Na TABELA 35 são apresentados os limites de emissões para as regulamentações M4 e M5, já com emprego do ciclo WMTC nos ensaios de certificação. Observa-se que a entrada em vigor da fase M4 a partir de 2014 é restrita aos novos modelos lançados. Os limites de emissões da fase M4 são os mesmos praticados pela fase M3 apenas com mudanças no ciclo de condução. Na fase M5, que entrou em vigor a partir de 2016 para todos os modelos, ocorreram mudanças mais significativas nos limites de emissões de THC visando principalmente à redução de compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio.

TABELA 35 – LIMITES DE EMISSÃO PARA CICLOMOTORES, MOTOCICLOS E SIMILARES

Veículos	Data vigência	Velocidade máxima	CO (g km <sup>-1</sup> )	THC (g km <sup>-1</sup> )	NOx (g km <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (g km <sup>-1</sup> )	Emissão evaporativa <sup>1</sup>
Ciclomotores	01/01/2014	-	1,0	0,8	0,15	informar	1,0 g
Motociclos e Similares	01/01/2014 (novos modelos)	< 130 km/h	2,0	0,8	0,15	-	1,0 g
		≥ 130 km/h	2,0	0,3	0,15	-	1,0 g
	01/01/2016 (todos modelos)	< 130 km/h	2,0	0,56	0,13	informar	1,0 g
		≥ 130 km/h	2,0	0,25	0,17	informar	1,0 g

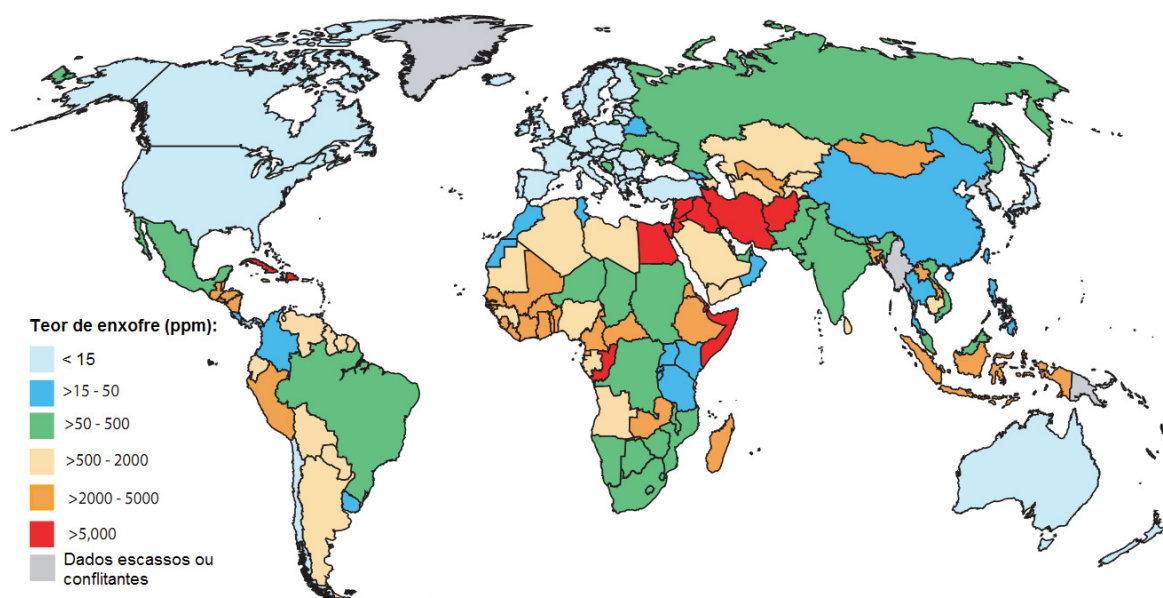
FONTE: Adaptado de IBAMA (2011).

NOTA: <sup>1</sup> – Ensaio de emissão evaporativa início em Jan/2016, usando como norma de execução NBR 11481.

## APÊNDICE 2 – TEOR DE ENXOFRE NOS COMBUSTÍVEIS

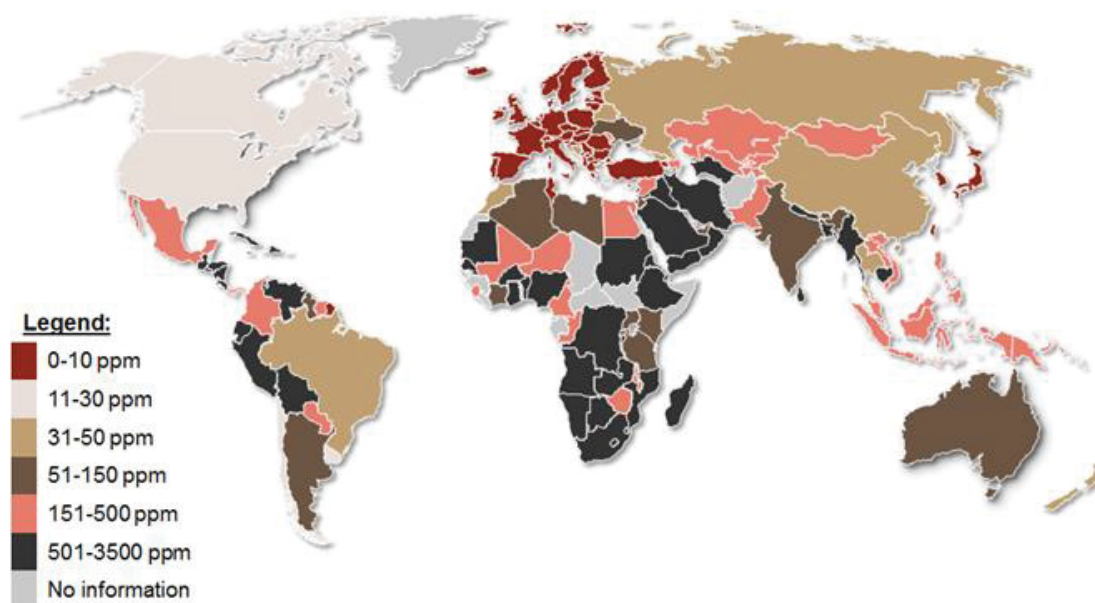
As FIGURA 109 e FIGURA 110 apresentam uma visão geral do teor de enxofre presente, respectivamente, no óleo diesel e gasolina no mercado global.

FIGURA 109 – TEOR DE ENXOFRE NO ÓLEO DIESEL – BASE JUNHO DE 2015



FONTE: Adaptado de UNEP (2017).

FIGURA 110 – TEOR DE ENXOFRE NA GASOLINA – BASE ABRIL DE 2015



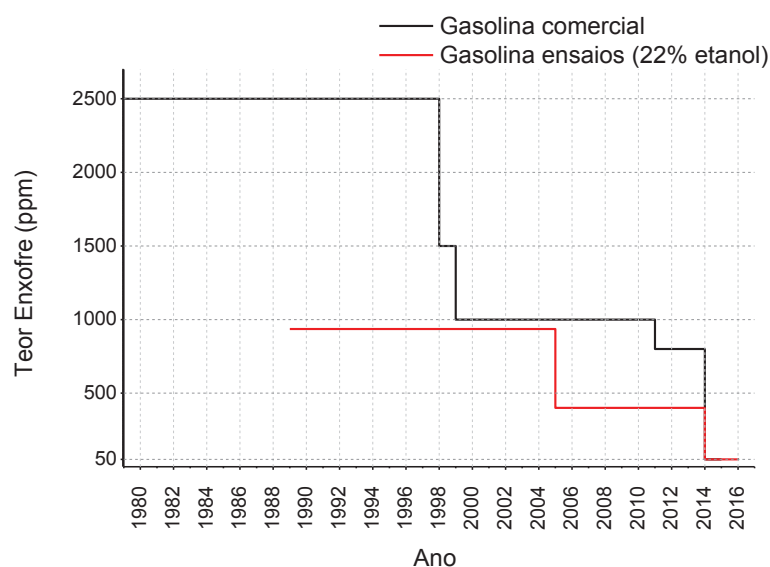
FONTE: Adaptado de STRATAS ADVISORS (2015).

Com a entrada em vigor dos limites de emissões da fase L6, em 2014, o teor de enxofre máximo da gasolina para o mercado brasileiro teve uma redução significativa, passando de um limite máximo de 800 ppmv para 50 ppmv. Abaixo, a



FIGURA 111 apresenta a evolução dos teores máximos de enxofre na gasolina comercial brasileira nas últimas décadas. Na mesma figura são apresentados os teores de enxofre para os combustíveis utilizados em ensaios de emissões. Tais combustíveis utilizados em ensaios de emissões em veículos e motores, com finalidade compulsória junto ao IBAMA, também são normatizados de acordo com portarias da ANP. Além de um menor teor de enxofre até o ano de 2014, a gasolina para ensaios possui um teor de etanol fixo, sendo adotado o valor de  $22\% \pm 1$  de etanol anidro na gasolina de testes.

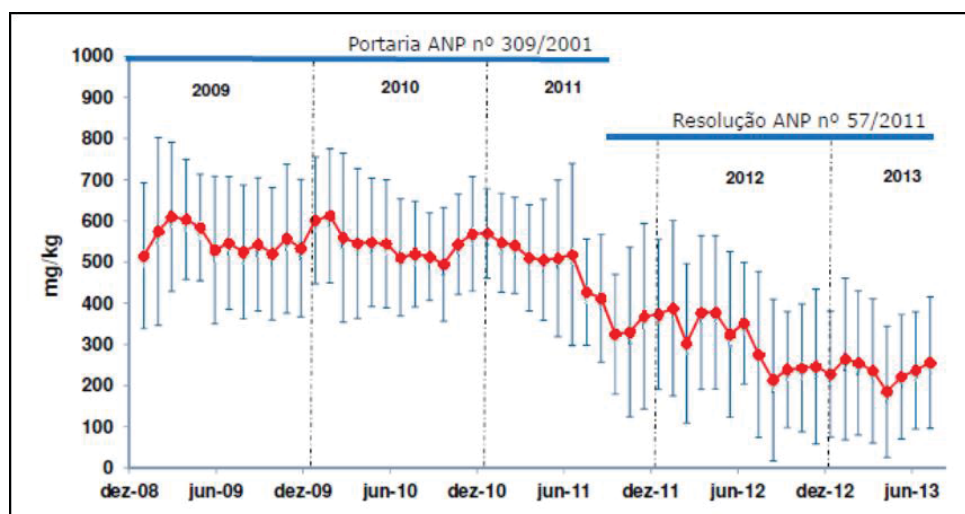
FIGURA 111 – EVOLUÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE NA GASOLINA BRASILEIRA ENTRE 1979 E 2015



FONTE: Adaptado de IBAMA (2011); CETESB (2013b); ANP (2014).

Na FIGURA 112 é possível observar os valores médios de enxofre da gasolina comercializada no Brasil nos últimos anos.

FIGURA 112 – TEOR MÉDIO DE ENXOFRE NA GASOLINA BRASILEIRA ENTRE 2008 E 2013

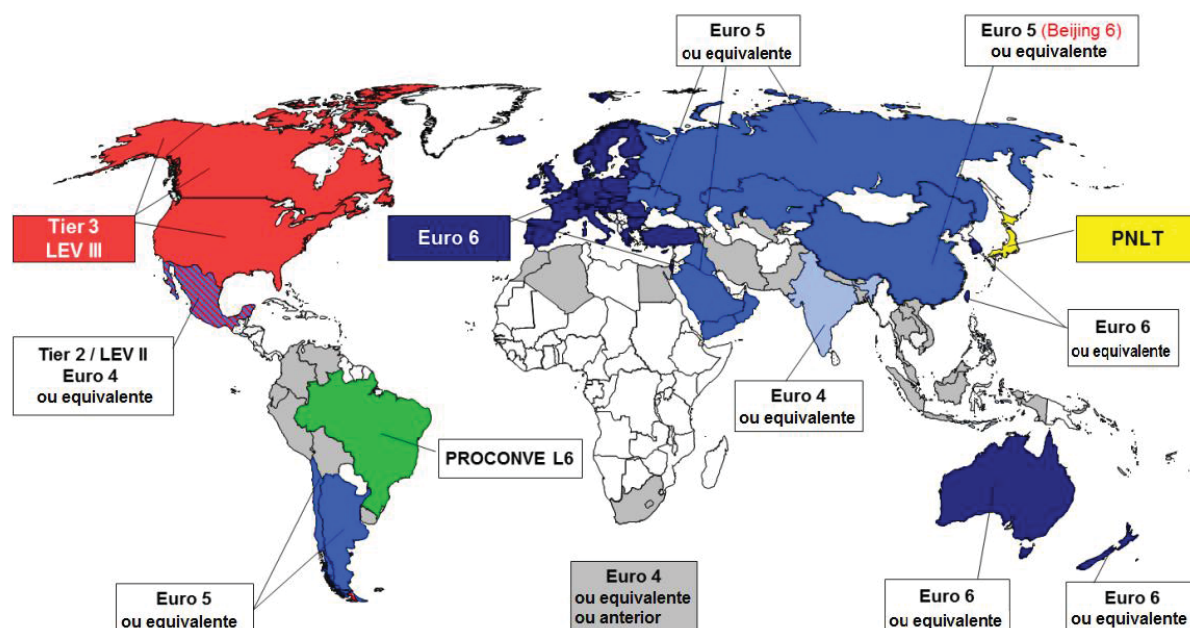


FONTE: ANP (2014).

### APÊNDICE 3 – CENÁRIO GLOBAL DE REGULAMENTAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES

A FIGURA 113 apresenta uma visão geral da regulamentação para as emissões de veículos leves de passageiros do ciclo Otto nos principais mercados do mundo, entre os anos de 2015 e 2018.

FIGURA 113 – REGULAMENTAÇÃO DAS EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



FONTE: Adaptado de AVL (2014).

A TABELA 36 apresenta os compostos regulamentados em cada legislação e os valores máximos de emissão. Observa-se que os ciclos de condução diferem entre as normativas, o que limita uma comparação direta entre os valores.

TABELA 36 – LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS

Compostos legislados:	Regulamentações de emissões (mg km <sup>-1</sup> )					
	Euro 4	Euro 5	Euro 6	Brasil L6	Tier 2 <sup>6</sup>	PNLT
THC	100	100	100	-	-	-
CO	1.000	1.000	1.000	1.300	2.600	630
NOx	80	60	60	80	44	80
NMHC	-	68	68	50	-	24
Aldeídos	-	-	-	20 <sup>4</sup>	11 <sup>5</sup>	-
NMOG <sup>1</sup>	-	-	-	-	56	-
MP <sup>2</sup>	-	5	4,5	-	-	5
NP <sup>3</sup>	-	-	6,0E11	-	-	-

FONTE: Adaptado de DELPHI (2017).

NOTAS: <sup>1</sup> – Gases orgânicos do tipo não metano (somatório das emissões de NMHC, aldeídos e álcool não queimado), observa-se que na legislação brasileira as emissões de álcool não queimado podem ser descontadas da emissão final de NMHC; <sup>2</sup> – material particulado, limite para veículos Otto com injeção direta de combustível; <sup>3</sup> – números de partículas (N km<sup>-1</sup>); <sup>4</sup> – aldeídos totais (soma da emissão de acetaldeído e formaldeído); <sup>5</sup> – emissão de formaldeído; <sup>6</sup> – valores referentes ao Bin 5.

## APÊNDICE 4 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE EMISSÕES

### 1) VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS

- **Fase Pré-PROCONVE:**

Código do veículo: PP-E-01	Fase do PROCONVE: PP
Ano fabricação/ modelo: 1985/1985	Km inicial: 3.370
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 96
Combustível: Álcool	Sistema injeção: Carburador Corpo Simples
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: PPHE-E-03	Fase do PROCONVE: PP
Ano fabricação/ modelo: 1985/1985	Km inicial: 74.241
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 81
Combustível: Álcool	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: PP-E-02	Fase do PROCONVE: PP
Ano fabricação/ modelo: 1985/1986	Km inicial: 38.744
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 99
Combustível: Álcool	Sistema injeção: Carburador de Corpo Duplo
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: PP-G-01 / PPHE-G-02	Fase do PROCONVE: PP
Ano fabricação/ modelo: 1980 / 1980	Km inicial: 82.311
Volume motor (l): 1.3	Potência (cv): 46
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 4 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

- **Fase L1:**

Código do veículo: L1-G-01/ L1HE-G-02	Fase do PROCONVE: L1
Ano fabricação/ modelo: 1991/1991	Km inicial: 28.268
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 100
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador de Corpo Duplo
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

- **Fase L2:**

Código do veículo: L2HE-G-03	Fase do PROCONVE: L2
Ano fabricação/ modelo: 1993/1993	Km inicial: 242,881
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 56
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L2-G-01	Fase do PROCONVE: L2
Ano fabricação/ modelo: 1995/1995	Km inicial: 537,511
Volume motor (l): 1.6	Potência (cv): 88
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Monoponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L2-G-02	Fase do PROCONVE: L2

Ano fabricação/ modelo: 1995/1996	Km inicial: 249,836
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 58
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Monoponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

• **Fase L3:**

Código do veículo: L3HE-G-07	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 1999/2000	Km inicial: 228,853
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 61
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-G-01	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2000/2000	Km inicial: 265,776
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 70
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-G-02	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2001/2001	Km inicial: 153,205
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 70
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-G-03	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2001/2001	Km inicial: 168,244
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 70
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-G-04	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2001/2001	Km inicial: 155,232
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 116
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-G-05	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2001/2001	Km inicial: 174,939
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 65
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-G-06	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2003/2004	Km inicial: 132,451
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 71
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-F-08	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2003/2004	Km inicial: 133,506
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 125/122
Combustível: Alcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão:	
Sistema de pós-tratamento: Manual de 5 Velocidades	
Código do veículo: L3-G-09	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2004/2005	Km inicial: 120,157
Volume motor (l): 1.6	Potência (cv): 98

Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L3-F-10 / L3-F-11	Fase do PROCONVE: L3
Ano fabricação/ modelo: 2004/2004	Km inicial: 146,641 / 140984
Volume motor (l): 1.6	Potência (cv): 103/101
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

• **Fase L4:**

Código do veículo: L4-F-03	Fase do PROCONVE: L4
Ano fabricação/ modelo: 2005/2005	Km inicial: 125.560
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 71/68
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L4-G-01 / L4-G-08	Fase do PROCONVE: L4
Ano fabricação/ modelo: 2006/2007	Km inicial: 94.912 / 113.301
Volume motor (l): 1.4	Potência (cv): 80
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L4HE-F-06	Fase do PROCONVE: L4
Ano fabricação/ modelo: 2007/2007	Km inicial: 126.929
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 66/65
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L4-F-04	Fase do PROCONVE: L4
Ano fabricação/ modelo: 2007/2008	Km inicial: 82.163
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 66/65
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L4-G-02	Fase do PROCONVE: L4
Ano fabricação/ modelo: 2008/2008	Km inicial: 97.970
Volume motor (l): 2.0	Potência (cv): 142
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L4-F-05 / L4-F-07	Fase do PROCONVE: L4
Ano fabricação/ modelo: 2008/2008	Km inicial: 68.539 / 72.795
Volume motor (l): 2.0	Potência (cv): 128/121
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	

• **Fase L5:**

Código do veículo: L5-07/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2009/2009	Km inicial: 80,372
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 65/65
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto Semi sequencial Indireta
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-01/G	Fase do PROCONVE: L5

Ano fabricação/ modelo: 2009/2010	Km inicial: 71,020
Volume motor (l): 1.6	Potência (cv): 126
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Sequencial
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-05/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2009/2010	Km inicial: 82,269
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 140/138
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-08/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2009/2010	Km inicial: 56,043
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 78/77
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-02/G	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2010/2010	Km inicial: 40,426
Volume motor (l): 2.0	Potência (cv): 145
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Automática de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-03/G	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2010/2011	Km inicial: 39,272
Volume motor (l): 1.4	Potência (cv): 82/80
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-04/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2010/2011	Km inicial: 51,674
Volume motor (l): 2.0	Potência (cv): 153/142
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: EFI
Transmissão: Automática de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-06/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2010/2011	Km inicial: 42,691
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 73/69
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Digital
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-09/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2010/2011	Km inicial: 42,220
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 76/72
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5HE-5/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2010/2011	Km inicial: 52,699
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 76/72
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 Velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L5-13/F	Fase do PROCONVE: L5
Ano fabricação/ modelo: 2013/2014	Km inicial: 6,122
Volume motor (l): 2.0	Potência (cv): 178/175
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Injeção Direta
Transmissão: Automática de 6 velocidades	



Sistema de pós-tratamento:

• **Fase L6:**

Código do veículo: L6-G-06	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2011/2011	Km inicial: 13,239
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 134
Combustível: Gasolina/Eletricidade	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: CVT	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L6-F-02	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2014/2015	Km inicial: 9,375
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 77/76
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L6-F-03	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2014/2015	Km inicial: 14,910
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 85/80
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L6-F-04	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2015/2016	Km inicial: 488
Volume motor (l): 1.4	Potência (cv): 88/85
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: L6-GNV-08	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2006/2006	Km inicial: 18.847
Volume motor (l): 1.8	Potência (cv): 114
Combustível: GNV	Sistema injeção: Eletrônica Mapeada
Transmissão: Automática de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC. Obs. Veículo importado não existente no mercado nacional	
Código do veículo: L6-G-07	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2016/2016	Km inicial: 5.674
Volume motor (l): 1,6	Potência (cv):
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Injeção direta/ turbo
Transmissão: Automática	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L6-T-01	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2015/2016	Km inicial: 21.825
Volume motor (l): 1,4	Potência (cv): 88
Combustível: Gas/Alc/GNV	Sistema injeção: Injeção eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: L6-F-05	Fase do PROCONVE: L6
Ano fabricação/ modelo: 2015/2016	Km inicial: 8.500
Volume motor (l): 1.0	Potência (cv): 82
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Eletrônica Multiponto
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	

## 2) MOTOCICLOS

• **Fase PRÉ-PROMOT:**

Código do veículo: PM-G-01	Fase do PROMOT: PM
----------------------------	--------------------

Ano fabricação/ modelo: 2002/2002	Km inicial: 52,250
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 11.2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: PM-G-02	Fase do PROMOT: PM
Ano fabricação/ modelo: 2002/2002	Km inicial: 91,657
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 12.5
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: PMHE-G-03	Fase do PROMOT: PM
Ano fabricação/ modelo: 2002/2003	Km inicial: 92,179
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 12.5
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

• **Fase M1:**

Código do veículo: M1-G-01	Fase do PROMOT: M1
Ano fabricação/ modelo: 2003/2004	Km inicial: 65,475
Volume motor (cc): 100	Potência (cv): 6.43
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M1HE-G-03	Fase do PROMOT: M1
Ano fabricação/ modelo: 2004/2005	Km inicial: 62,885
Volume motor (cc): 150	Potência (cv): 14.2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M1-G-02	Fase do PROMOT: M1
Ano fabricação/ modelo: 2005/2005	Km inicial: 57,264
Volume motor (cc): 150	Potência (cv): 14.2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M1-G-04	Fase do PROMOT: M1
Ano fabricação/ modelo: 2005/2005	Km inicial: 59,282
Volume motor (cc): 150	Potência (cv): 14.2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

• **Fase M2:**

Código do veículo: M2-G-01	Fase do PROMOT: M2
Ano fabricação/ modelo: 2008/2008	Km inicial: 35,006
Volume motor (cc): 250	Potência (cv): 24
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 6 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M2-G-02	Fase do PROMOT: M2
Ano fabricação/ modelo: 2008/2008	Km inicial: 46,339
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 12.1
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	



Código do veículo: M2-G-03	Fase do PROMOT: M2
Ano fabricação/ modelo: 2008/2008	Km inicial: 49,573
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 12.5
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M2HE-G-04	Fase do PROMOT: M2
Ano fabricação/ modelo: 2008/2008	Km inicial: 51,786
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 12.5
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	

• **Fase M3:**

Código do veículo: M3-G-02	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2009/2009	Km inicial: 37,574
Volume motor (cc): 123.7	Potência (cv): 10.2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-F-06	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2009/2009	Km inicial: 45,306
Volume motor (cc): 150	Potência (cv): 14.2
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica PGM-FI
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-G-01	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2010/2010	Km inicial: 21,197
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 9.1
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica PGM-FI
Transmissão: Manual de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3HE-G-04	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2010/2010	Km inicial: 38,887
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 9.1
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica PGM-FI
Transmissão: Manual de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-G-03	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2011/2011	Km inicial: 17,853
Volume motor (cc): 291.6	Potência (cv): 26.5
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica PGM-FI
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: M3-F-07	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2011/2011	Km inicial: 18,801
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 9.1
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica PGM-FI
Transmissão: Manual de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-F-05	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2012/2013	Km inicial: 3,526
Volume motor (cc): 250	Potência (cv): 21.0
Combustível: Álcool/Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-G-08	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2009/2009	Km inicial:

Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 9,1
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: M3-G-10	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2011/2012	Km inicial: 11.300
Volume motor (cc): 125	Potência (cv): 10,2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-G-11	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2011/2012	Km inicial: 14.050
Volume motor (cc): 115	Potência (cv): 8,2
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Carburador
Transmissão: Manual de 4 velocidades	
Sistema de pós-tratamento:	
Código do veículo: M3-F-12	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2015/2015	Km inicial: 2.185
Volume motor (cc): 150	Potência (cv): 14,3
Combustível: Gasolina/Etanol	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: M3-F-13	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2012/2012	Km inicial:
Volume motor (cc): 150	Potência (cv): 14,3
Combustível: Gasolina/Etanol	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: M3-G-09	Fase do PROMOT: M3
Ano fabricação/ modelo: 2011/2012	Km inicial:
Volume motor (cc): 291.6	Potência (cv): 26.5
Combustível: Gasolina	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	

• **Fase M4:**

Código do veículo: M4-F-01	Fase do PROMOT: M4
Ano fabricação/ modelo: 2016/2016	Km inicial: 3.576
Volume motor (cc): 160,0	Potência (cv): 15,1
Combustível: Gasolina/ETANOL	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	
Código do veículo: M4-F-02	Fase do PROMOT: M4
Ano fabricação/ modelo: 2016/2016	Km inicial: 2.736
Volume motor (cc): 250	Potência (cv): 21,0
Combustível: Gasolina/ETANOL	Sistema injeção: Injeção Eletrônica
Transmissão: Manual de 5 velocidades	
Sistema de pós-tratamento: TWC	

## APÊNDICE 5 – CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NO PLANO DE ENSAIOS

### CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NOS VEÍCULOS OTTO

Identificação: EAR	Teor de água (% v/v): 0,102
Teor etanol anidro (% v/v): 99.79	Teor gasolina (% v/v): 0
Teor enxofre (ppmv): 0.7	Densidade (kg/l): 0.7902
Poder calorífico inferior (kJ): 27365	Poder calorífico superior (kJ): 30334
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: EHR	Teor etanol hidratado (% v/v): 96.2
Teor de água (% v/v): 4.2	Teor gasolina (% v/v): 0
Teor enxofre (ppmv): 4.6	Densidade (kg/l): 0.8098
Poder calorífico inferior (kJ): 24940	Poder calorífico superior (kJ): 28048
Número octano (ROM ou MON):	Obs.: Aguardando certificado
Identificação: A22 S200	Teor etanol hidratado (% v/v): 0
Teor etanol anidro (% v/v): 22.0	Teor gasolina (% v/v): 78.0
Teor enxofre (ppmv): 56.4	Densidade (kg/l): 0.7470
Poder calorífico inferior (kJ): 39793	Poder calorífico superior (kJ): 42842
Número octano (ROM ou MON):	Obs.: Gasolina padrão de emissões fase L5
Identificação: A22 S50	Teor etanol hidratado (% v/v): 0
Teor etanol anidro (% v/v): 22	Teor gasolina (% v/v): 78
Teor enxofre (ppmv): 30.6	Densidade (kg/l): 0,7430
Poder calorífico inferior (kJ): 39054	Poder calorífico superior (kJ): 42103
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: A22 ETBE-5/S50	Teor etanol hidratado (% v/v): 0
Teor etanol anidro (% v/v): 18	Teor gasolina (% v/v): 78
Teor enxofre (ppmv): 33.5	Densidade (kg/l): 0.7570
Poder calorífico inferior (kJ): 39569	Poder calorífico superior (kJ): 42565
Número octano (ROM ou MON):	Obs.: Teor de ETBE: 4,48 %
Identificação: A22 S800	Teor etanol hidratado (% v/v): 0
Teor etanol anidro (% v/v): 22	Teor gasolina (% v/v): 78
Teor enxofre (ppmv): 285	Densidade (kg/l): 0.7447
Poder calorífico inferior (kJ): 38781	Poder calorífico superior (kJ): 41830
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: A11H50 (E61)	Teor etanol hidratado (% v/v): 50
Teor etanol anidro (% v/v): 11	Teor gasolina (% v/v): 39
Teor enxofre (ppmv): 27.5	Densidade (kg/l): 0.7765
Poder calorífico inferior (kJ): 32615	Poder calorífico superior (kJ): 35692
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: H85 S50	Teor etanol hidratado (% v/v): 85
Teor etanol anidro (% v/v):	Teor gasolina (% v/v): 15
Teor enxofre (ppmv): 8.8	Densidade (kg/l): 0,7994
Poder calorífico inferior (kJ): 27614	Poder calorífico superior (kJ): 30835
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: A85 S50	Teor etanol hidratado (% v/v): 0
Teor etanol anidro (% v/v): 85	Teor gasolina (% v/v): 15
Teor enxofre (ppmv): 6.3	Densidade (kg/l): 0.7944
Poder calorífico inferior (kJ): 29232	Poder calorífico superior (kJ): 32315
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:

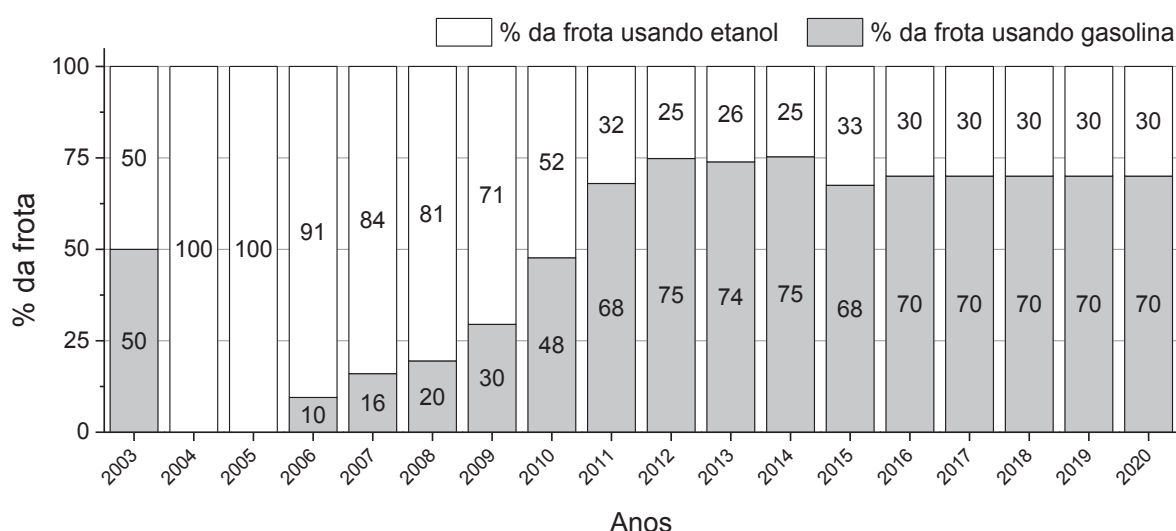
Identificação: A22 L6	Teor etanol hidratado (% v/v):
Teor etanol anidro (% v/v): 22	Teor gasolina (% v/v): 78
Teor enxofre (ppmv): 37	Densidade (kg/l): 0,7460
Poder calorífico inferior (kJ): 39379	Poder calorífico superior (kJ): 42428
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: A25 L6	Teor etanol hidratado (% v/v):
Teor etanol anidro (% v/v): 25	Teor gasolina (% v/v): 75
Teor enxofre (ppmv): 36	Densidade (kg/l): 0,7469
Poder calorífico inferior (kJ): 38795	Poder calorífico superior (kJ): 41882
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: A27.5 L6	Teor etanol hidratado (% v/v):
Teor etanol anidro (% v/v): 27	Teor gasolina (% v/v): 73
Teor enxofre (ppmv): 35	Densidade (kg/l): 0,7504
Poder calorífico inferior (kJ): 38514	Poder calorífico superior (kJ): 41615
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:
Identificação: A30 L6	Teor etanol hidratado (% v/v):
Teor etanol anidro (% v/v): 30	Teor gasolina (% v/v): 70
Teor enxofre (ppmv): 34	Densidade (kg/l): 0,7510
Poder calorífico inferior (kJ): 38474	Poder calorífico superior (kJ): 41580
Número octano (ROM ou MON):	Obs.:

## APÊNDICE 6 – PARÂMETROS ADOTADOS PARA CÁLCULO DAS EMISSÕES ENTRE 1980 E 2020

Os parâmetros de correção da intensidade de uso foram estimados para os anos de 2016 a 2020 usando a média dos últimos dez anos; assim para gasolina o fator de correção usado foi de 1,06 e, para etanol, de 1,07. No Anexo 1 apresentam-se os fatores de correção de intensidade de uso para os anos de 1970 a 2015.

A divisão de uso entre etanol e gasolina para frota de veículos *flex fuel* usou os parâmetros do IEV, sendo os dados para os anos entre 2003 e 2015 apresentados no Anexo 1. Para os anos de 2016 a 2020 utilizou-se a projeção de 70% de uso para gasolina e 30% para etanol, valores aproximados da média dos dados dos últimos cinco anos. A FIGURA 114 apresenta o perfil de utilização da frota *flex fuel* com uso de gasolina e etanol propostos pelo IEV (2003 a 2015) e os assumidos por esta pesquisa, anos entre 2016 e 2020, utilizados para compor as estimativas das emissões anuais dessa categoria de veículos.

FIGURA 114 – ESTIMATIVAS DA PORCENTAGEM DE USO DA FROTA *FLEX FUEL* COM GASOLINA E ETANOL HIDRATADO

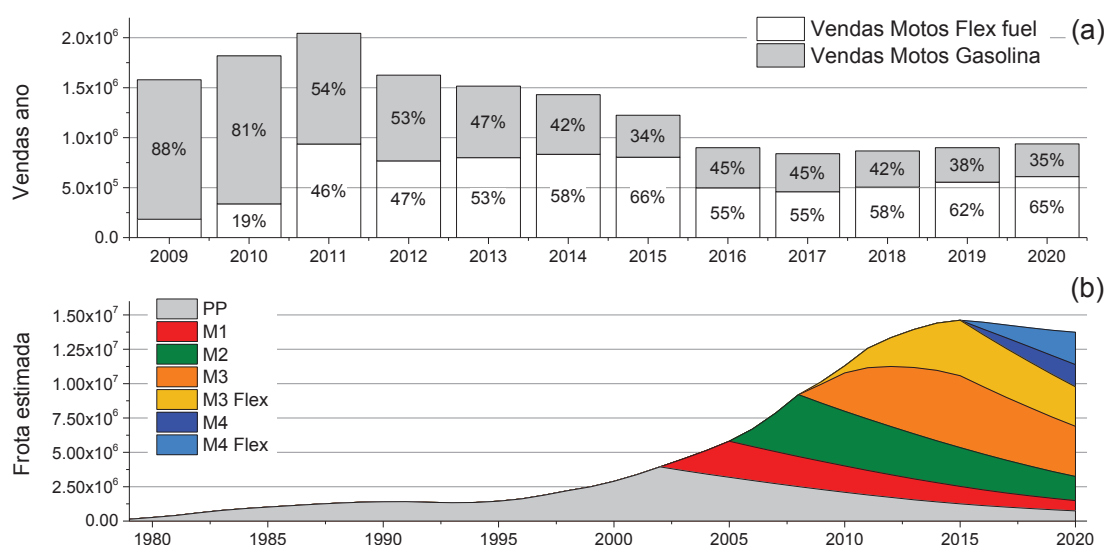


Para estimativa das frotas de veículos leves de passageiros e motocicletas, utilizaram-se dados de vendas da ABRACICLO (2012; 2017) e ANFAVEA (2017) conforme modelo proposto pelo IEV (MMA, 2014). Observa-se que os dados de vendas da ANFAVEA foram revisados, apresentando diferenças dos valores publicados no IEV. Para os anos de 2017 a 2020 foram efetuadas estimativas das vendas dessas categorias de veículos.

Referente à frota de motocicletas, observou-se nos dados de vendas que essa categoria de veículos vem apresentando quedas contínuas nas vendas desde 2012 (ABRACICLO, 2013, 2016). No tocante aos motocicletas a gasolina, há influência da entrada dos motocicletas *flex fuel* que aumentaram sua participação no mercado. Para as projeções de vendas nos anos de 2017 a 2020, assumiram-se os seguintes parâmetros nesta pesquisa: motos gasolina redução de 5% nas vendas comparadas ao ano anterior; motos *flex fuel*, para ano de 2017, redução de 8% em relação às vendas de 2016 e, para os anos seguintes, um aumento de 10% nas vendas comparadas ao ano anterior.

Na FIGURA 115 (a) observa-se o perfil das vendas dos motocicletos novos, dados da ABRACICLO até o ano de 2016 e, entre 2017 a 2020, as projeções adotadas. Apresentam-se a porcentagem entre motocicletos *flex fuel* e dedicados à gasolina, vendidos em cada ano, e as projeções impostas ao modelo. Observa-se, ainda, a frota estimada de motocicletos, com a participação das fases do PROMOT (b). Após o ano de 2015 a frota apresenta queda no número de veículos, com projeção de sua redução em 6% para o ano de 2020, comparado a 2015.

FIGURA 115 – VENDAS E PROJEÇÃO DE VENDAS DE MOTOCICLOS (A); FROTA ESTIMADA E PROJEÇÃO DA FROTA DE MOTOCICLOS (B)

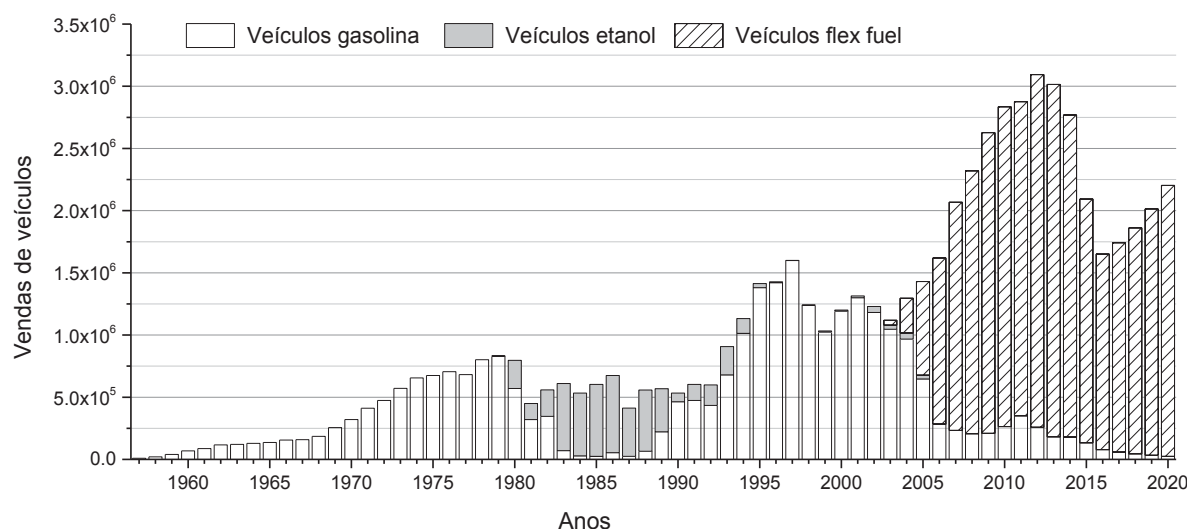


FONTE: Dados adaptados de ABRACICLO (2013; 2017) e MMA (2014) até ano de 2016.

Para a frota de veículos leves de passageiros dedicados à gasolina observou-se uma redução média de 23% de sua participação nas vendas dos últimos anos. Para estimar a frota de 2017 a 2020 assumiu-se uma redução de 25% em relação ao ano anterior, tendo como base as vendas de 2016.

Para os veículos *flex fuel*, conforme informações do *site* da ANFAVEA (2017), foram licenciados até setembro de 2017 aproximadamente 1.450.000 novos veículos. Com base nesses dados, foram projetadas as vendas para 2017 com aumento de 7% comparadas ao ano anterior; para os anos seguintes, um aumento de 8, 9 e 10% com base no ano anterior. Na FIGURA 116 apresentam-se as vendas de veículos leves de passageiros do período de 1957 a 2016 (ANFAVEA, 2017) e as projeções de vendas para os anos de 2017 a 2020.

FIGURA 116 – VENDAS E PROJEÇÃO DE VENDAS PARA VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS



FONTE: Dados adaptados de ANFAVEA (2017) até ano de 2016.

A composição da frota de veículos leves de passageiros e motocicletas por ano calendário, gerada a partir das vendas citadas, é mostrada na TABELA 37. A frota apresentada foi a base utilizada para gerar as projeções desta pesquisa para o modelo proposto e para metodologia do IEV.

Os fatores de emissão utilizados para as projeções do modelo do IEV e para base do modelo proposto para os anos de 2016 a 2020 foram os mesmos apresentados para o ano de 2015 (CETESB, 2016). Observa-se que não existe uma definição oficial da introdução de novos limites de emissões que passem a vigorar antes do ano de 2020. Para veículos dedicados a etanol, após 2007, não são apresentados fatores de emissão devido a sua pequena participação na frota. Para essa frota foram, então, utilizados os valores de emissão dos veículos *flex etanol*. Para os anos de 2017 a 2020 não foram consideradas vendas para esses veículos.

Para determinação da emissão dos compostos em estudo utilizou-se a equação (29) (MMA, 2014).

$$E = F_r \times I_u \times F_e \quad (29)$$

sendo

$E$  – taxa de emissão no período inventariado ( $\text{g ano}^{-1}$ );

$F_r$  – frota circulante de veículos ano-modelo considerado (número de veículos);

$I_u$  - intensidade de uso do veículo do ano-modelo considerado, expressa em termos de quilometragem anual percorrida ( $\text{km ano}^{-1}$ );

$F_e$  – fator de emissão do poluente considerado, expresso em termos de massa de poluentes emitida por km percorrido ( $\text{g}_{\text{poluente km}^{-1}}$ ).



TABELA 37 – FROTA DE VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS E MOTOCICLOS POR ANO

ANO	Veículos leves de passageiros			Motociclos	
	Gasolina	Etanol	Flex fuel	Gasolina	Flex fuel
1980	7127772	228257	-	262540	-
1981	7242178	356082	-	402322	-
1982	7354659	566131	-	593820	-
1983	7163772	1100581	-	776829	-
1984	6903993	1596873	-	909549	-
1985	6614418	2162893	-	1015187	-
1986	6332830	2763127	-	1118191	-
1987	6003652	3121605	-	1223118	-
1988	5702093	3572495	-	1302791	-
1989	5548841	3861616	-	1370303	-
1990	5632499	3858588	-	1401070	-
1991	5727240	3895621	-	1413112	-
1992	5786101	3948535	-	1365754	-
1993	6096307	4043822	-	1332676	-
1994	6746532	4011889	-	1351962	-
1995	7769602	3876011	-	1447805	-
1996	8835571	3698310	-	1611610	-
1997	10077920	3502607	-	1893488	-
1998	10954222	3297480	-	2213339	-
1999	11601003	3094999	-	2495138	-
2000	12396213	2889332	-	2892160	-
2001	13272755	2689195	-	3382928	-
2002	13998631	2524372	-	3943729	-
2003	14551516	2350645	39002	4525324	-
2004	14983654	2201063	316991	5132912	-
2005	15052038	2041545	1066821	5813405	-
2006	14713945	1862859	2394178	6691496	-
2007	14284490	1693359	4213867	7842122	-
2008	13790479	1534925	6300172	9195036	-
2009	13267302	1387628	8669796	9973685	183375
2010	12772138	1251306	11165419	10781616	509376
2011	12344942	1125670	13575749	11157206	1414660
2012	11815610	1010317	16243764	11246213	2097165
2013	11207292	904753	18844989	11170645	2771617
2014	10603056	808464	21122591	10962387	3439280
2015	9964850	720934	22680872	10576211	4035982
2016	9290778	641613	23749737	10176834	4288847
2017	8561647	569939	24818466	9784473	4480033
2018	7860821	505376	25906499	9362699	4699641
2019	7191636	447386	27040966	8933587	4949849
2020	6556611	395440	28257638	8508084	5228758



## APÊNDICE 7 – EMISSÕES POR CLASSE DAS AMOSTRAS

### 1) EMISSÕES DE REFERÊNCIA PARA OS FATORES DE EMISSÃO EM MOTOCICLOS

TABELA 38 – EMISSÕES EM MOTOCICLOS POR AMOSTRAS, VALORES MÉDIOS E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Identificação		Emissões					
Amostra	Combustível	CO	CV	THC	CV	NOx	CV
		g km <sup>-1</sup>	%	g km <sup>-1</sup>	%	g km <sup>-1</sup>	%
PM-G-01	A22-S800	18.76	4.7	1.47	4.6	0.03	7.7
PM-G-02	A22-S800	14.17	4.2	1.10	1.0	0.15	4.5
PMHE-G-03	A22-S800	14.83	3.2	1.52	5.6	0.09	2.1
M1-G-01	A22-S800	7.83	3.8	0.91	0.8	0.15	3.5
M1-G-02	A22-S800	11.69	8.5	0.90	3.7	0.19	9.0
M1HE-G-03	A22-S800	14.15	2.6	1.36	7.0	0.07	3.8
M1-G-04	A22-S800	8.67	3.5	0.84	2.8	0.11	5.9
M2-G-01	A22-S200	3.37	8.0	0.94	7.8	0.18	6.1
M2-G-02	A22-S200	7.28	8.4	0.75	5.1	0.16	5.9
M2-G-03	A22-S200	9.88	3.1	0.55	6.8	0.09	2.1
M2HE-G-04	A22-S200	15.65	3.1	2.04	13.1	0.08	5.4
M3-F-06	EHR	1.13	13.8	0.26	8.6	0.11	3.6
M3-F-07	EHR	0.50	8.1	0.21	7.5	0.06	14.0
M3-F-12	EHR	1.16	4.9	0.23	4.3	0.05	6.2
M3-F-13	EHR	1.13	6.1	0.26	5.1	0.05	1.2
M4-F-01	EHR	0.94	7.7	0.17	2.9	0.04	6.5
M4-F-02	EHR	1.39	8.4	0.22	3.6	0.04	6.3
M3-05-F	EHR	2.09	6.9	0.29	8.1	0.06	1.6
M3-G-01	A22-S50	1.50	4.7	0.23	5.0	0.09	5.6
M3-G-02	A22-S50	4.27	8.7	0.43	4.3	0.09	6.7
M3-F-06	A22-S50	4.05	10.2	0.39	6.4	0.15	4.2
M3-F-07	A22-S50	2.14	2.3	0.22	0.4	0.08	4.2
M3-G-08	A22-S50	1.40	0.5	0.24	1.4	0.09	8.7
M3HE-G-01	A22-S50	2.03	2.9	0.41	2.9	0.41	2.9
M3-G-10	A22-S50	3.42	7.2	0.30	3.7	0.06	7.9
M3-G-11	A22-S50	2.15	19.1	0.18	4.8	0.03	5.2
M3-F-12	A22-S50	1.12	3.0	0.16	4.6	0.05	4.7
M3-F-13	A22-S50	1.19	4.6	0.18	2.2	0.07	2.5
M4-F-01	A22-S50	0.74	8.6	0.12	2.2	0.08	4.0
M4-F-02	A22-S50	1.10	7.6	0.17	7.0	0.08	0.6
M3-G-03	A22-S50	3.06	3.3	0.13	6.3	0.10	3.0
M3-05-F	A22-S50	1.59	5.2	0.15	1.0	0.12	4.1
M3-G-09	A22-S50	1.76	2.5	0.12	8.4	0.13	4.0

### 2) EMISSÕES DE REFERÊNCIA PARA OS FATORES DE EMISSÃO EM VEÍCULOS LEVES

TABELA 39 – EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES COM USO DE GASOLINA

Identificação		Emissões					
Amostra	Combustível	CO	CV	THC	CV	NOx	CV
		g km <sup>-1</sup>	%	g km <sup>-1</sup>	%	g km <sup>-1</sup>	%
L2-G-01	A22-S800	4.85	7%	1.52	5%	0.94	11%
L2-G-02	A22-S800	7.04	6%	0.50	9%	0.58	1%
L2HE-G-03	A22-S800	25.31	9%	2.89	12%	1.08	17%
L3-G-01	A22-S800	3.89	9%	0.35	3%	0.56	3%
L3-G-02	A22-S800	3.29	5%	0.47	4%	0.75	4%
L3-G-03	A22-S800	0.78	6%	0.20	3%	0.14	9%
L3-G-04	A22-S800	1.81	4%	0.19	4%	0.26	1%
L3-G-05	A22-S800	3.03	3%	0.38	3%	0.89	3%
L3-G-06	A22-S800	6.98	13%	0.34	6%	0.63	4%
L3HE-G-07	A22-S800	3.32	13%	0.40	10%	0.47	7%
L3-F-08	A22-S800	0.62	10%	0.12	6%	0.15	4%
L3-G-09	A22-S800	0.87	8%	0.13	4%	0.19	9%
L3-F-10	A22-S800	1.57	5%	0.11	2%	0.31	3%
L3-F-11	A22-S800	1.90	17%	0.11	12%	0.19	5%
L4-G-01	A22-S200	1.15	1%	0.10	6%	0.25	2%
L4-G-02	A22-S200	1.04	38%	0.09	17%	0.09	7%
L4-F-03	A22-S200	2.92	5%	0.43	3%	1.07	3%
L4-F-04	A22-S200	1.63	10%	0.15	4%	0.28	2%
L4-F-05	A22-S200	0.82	16%	0.10	15%	0.10	17%
L4HE-F-06	A22-S200	13.98	4%	2.33	2%	0.89	2%
L4-F-07	A22-S200	1.25	17%	0.10	4%	0.10	12%
L4-G-08	A22-S200	0.79	27%	0.07	9%	0.07	4%
L5-G-01	A22-S200	0.46	9%	0.04	10%	0.09	16%
L5-G-02	A22-S200	0.74	17%	0.06	19%	0.12	1%
L5-F-03	A22-S200	0.64	9%	0.05	4%	0.15	2%
L5-F-04	A22-S200	0.41	17%	0.03	4%	0.04	16%
L5-F-05	A22-S200	0.45	8%	0.03	8%	0.12	4%
L5-F-06	A22-S200	0.38	14%	0.04	10%	0.06	21%
L5-F-07	A22-S200	0.41	19%	0.16	11%	0.03	28%
L5-F-08	A22-S200	0.16	14%	0.03	8%	0.03	4%
L5-F-09	A22-S200	0.71	8%	0.05	6%	0.11	11%
L5HE-F-10	A22-S200	34.31	5%	1.72	2%	0.13	4%
L5-F-11	A22-S200	0.29	7%	0.04	17%	0.03	14%
L5-F-12	A22-S200	0.19	12%	0.03	6%	0.19	7%
L5-F-13	A22-S200	0.18	8%	0.01	7%	0.02	3%
L6-T-01	A22-S50	0.23	9%	0.01	9%	0.02	11%
L6-F-02	A22-S50	0.54	28%	0.04	5%	0.07	23%
L6-F-03	A22-S50	0.24	47%	0.05	12%	0.09	34%
L6-F-04	A22-S50	0.26	17%	0.02	11%	0.01	4%
L6-F-05	A22-S50	0.23	12%	0.03	10%	0.02	27%
L6-G-06	A22-S50	0.25	11%	0.03	24%	0.02	40%
L6-G-07	A22-S50	0.06	20%	0.01	15%	0.00	50%
L6-GNV-08	GNV	0.13	8%	0.01	6%	0.00	22%

TABELA 40 – EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES COM USO DE ETANOL

Identificação		Emissões					
Amostra	Combustível	CO	CV	THC	CV	NOx	CV
		g km <sup>-1</sup>	%	g km <sup>-1</sup>	%	g km <sup>-1</sup>	%
L3-F-08	EHR	0.49	8%	0.16	3%	0.19	7%
L3-F-10	EHR	1.06	13%	0.17	9%	0.22	8%
L3-F-11	EHR	1.34	8%	0.21	9%	0.22	15%
L4-F-03	EHR	2.16	2%	0.45	1%	0.63	2%
L4-F-04	EHR	0.85	6%	0.17	11%	0.09	17%
L4-F-05	EHR	0.50	9%	0.17	7%	0.07	29%
L4HE-F-06	EHR	5.19	5%	1.57	9%	0.70	1%
L4-F-07	EHR	0.90	19%	0.20	8%	0.08	15%
L5-F-03	EHR	0.71	5%	0.12	5%	0.08	17%
L5-F-04	EHR	0.54	7%	0.10	3%	0.06	9%
L5-F-05	EHR	0.54	9%	0.08	14%	0.15	3%
L5-F-06	EHR	0.54	16%	0.10	15%	0.08	10%
L5-F-07	EHR	0.56	11%	0.17	11%	0.02	31%
L5-F-08	EHR	0.25	9%	0.06	2%	0.03	20%
L5-F-09	EHR	0.54	10%	0.06	11%	0.02	3%
L5-F-11	EHR	0.58	12%	0.08	5%	0.02	12%
L5-F-12	EHR	0.30	10%	0.07	25%	0.23	4%
L5-F-13	EHR	0.24	13%	0.02	8%	0.01	28%
L6-T-01	EHR	0.56	12%	0.05	13%	0.01	18%
L6-F-02	EHR	0.49	14%	0.09	4%	0.07	40%
L6-F-03	EHR	0.58	6%	0.17	20%	0.04	70%
L6-F-04	EHR	0.52	9%	0.08	10%	0.01	26%
L6-F-05	EHR	0.29	11%	0.05	6%	0.01	7%

## APÊNDICE 8 – EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO

### A) MOTOCICLOS

TABELA 41 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p	Ua
M1	2003	CO	Fator	4.0677	12.1533	2008.4442	0.1489	0.571
			Erro	0.2369	0.0207	0.2233	0.0062	
M1	2004	CO	Fator	5.3253	12.8892	2009.1799	0.1620	0.571
			Erro	0.2138	0.0188	0.2009	0.0068	
M1	2005	CO	Fator	1.3846	10.6199	2010.9637	0.1253	0.571
			Erro	0.2938	0.0253	0.2789	0.0053	
M2	2006	CO	Fator	0.7081	11.6805	2011.8732	0.1289	0.419
			Erro	0.3408	0.0293	0.2661	0.0054	
M2	2007	CO	Fator	0.2994	11.4490	2012.9372	0.1262	0.419
			Erro	0.3515	0.0302	0.2748	0.0053	
M2	2008	CO	Fator	-0.1831	11.1788	2014.0078	0.1232	0.419
			Erro	0.3627	0.0311	0.2838	0.0052	
M3 FLEX ETANOL	2009	CO	Fator	-0.5475	4.3923	2015.4013	0.0796	0.121
			Erro	0.1796	0.0129	0.4485	0.0029	
M3 FLEX ETANOL	2010	CO	Fator	-0.5475	4.3923	2016.4013	0.0796	0.121
			Erro	0.1796	0.0129	0.4485	0.0029	
M3 FLEX ETANOL	2011	CO	Fator	-0.3914	4.4556	2017.4444	0.0816	0.121
			Erro	0.1755	0.0128	0.4391	0.0030	
M3 FLEX ETANOL	2012	CO	Fator	-0.0629	4.5953	2018.5020	0.0859	0.121
			Erro	0.1673	0.0126	0.4198	0.0033	
M3 FLEX ETANOL	2013	CO	Fator	-0.1973	4.5366	2019.4876	0.0841	0.121
			Erro	0.1713	0.0128	0.4294	0.0032	
M3 FLEX ETANOL	2014	CO	Fator	-0.1973	4.5366	2020.4876	0.0841	0.121
			Erro	0.1713	0.0128	0.4294	0.0032	
M3 FLEX ETANOL	2015	CO	Fator	-0.2461	4.5154	2021.4811	0.0835	0.121
			Erro	0.1728	0.0128	0.4331	0.0031	
M3 GASOLINA	2009	CO	Fator	0.4335	5.3648	2014.8520	0.1299	0.405
			Erro	0.1529	0.0132	0.2639	0.0054	
M3 FLEX GASOLINA	2009 FLEX	CO	Fator	0.0487	5.1461	2014.9876	0.1245	0.405
			Erro	0.1634	0.0141	0.2828	0.0053	
M3 GASOLINA	2010	CO	Fator	0.0366	5.1397	2015.9904	0.1243	0.405
			Erro	0.1635	0.0141	0.2829	0.0052	
M3 FLEX GASOLINA	2010 FLEX	CO	Fator	0.0487	5.1461	2015.9876	0.1245	0.405
			Erro	0.1634	0.0141	0.2828	0.0053	
M3 GASOLINA	2011	CO	Fator	-0.0115	5.1139	2017.0017	0.1235	0.405
			Erro	0.1638	0.0141	0.2834	0.0052	
M3 FLEX GASOLINA	2011 FLEX	CO	Fator	0.0603	5.1526	2016.9840	0.1246	0.405
			Erro	0.1632	0.0140	0.2823	0.0053	
M3 GASOLINA	2012	CO	Fator	-0.1665	5.0302	2018.0411	0.1213	0.405
			Erro	0.1657	0.0141	0.2869	0.0050	
M3 FLEX GASOLINA	2012 FLEX	CO	Fator	0.0366	5.1397	2017.9904	0.1243	0.405
			Erro	0.1635	0.0141	0.2829	0.0052	
M3 GASOLINA	2013	CO	Fator	-0.2137	5.0044	2019.0542	0.1206	0.405
			Erro	0.1666	0.0142	0.2885	0.0050	
M3 FLEX GASOLINA	2013 FLEX	CO	Fator	-0.0475	5.0945	2019.0104	0.1230	0.405
			Erro	0.1641	0.0141	0.2840	0.0051	
M3 GASOLINA	2014	CO	Fator	-0.2137	5.0044	2020.0542	0.1206	0.405
			Erro	0.1666	0.0142	0.2885	0.0050	
M3 FLEX GASOLINA	2014 FLEX	CO	Fator	-0.0475	5.0945	2020.0104	0.1230	0.405
			Erro	0.1641	0.0141	0.2840	0.0051	
M3 GASOLINA	2015	CO	Fator	-0.1403	5.0444	2021.0341	0.1216	0.405
			Erro	0.1653	0.0141	0.2861	0.0050	
M3 FLEX GASOLINA	2015 FLEX	CO	Fator	-0.0102	5.1146	2021.0014	0.1236	0.405
			Erro	0.1638	0.0141	0.2834	0.0052	

TABELA 42 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p	Ua
M1	2003	THC	Fator	0.5506	1.1184	2007.1463	0.0571	0.054
			Erro	0.0184	0.0009	0.4963	0.0013	
M1	2004	THC	Fator	0.7859	1.1742	2010.3784	0.1041	0.054
			Erro	0.0132	0.0011	0.3438	0.0042	
M1	2005	THC	Fator	-0.2005	0.9389	2000.5903	0.0406	0.054
			Erro	0.0942	0.0009	1.4926	0.0011	
M2	2006	THC	Fator	0.1564	1.5433	2011.8537	0.1299	0.128
			Erro	0.0430	0.0037	0.2641	0.0054	
M2	2007	THC	Fator	0.1428	1.5357	2012.8689	0.1291	0.128
			Erro	0.0432	0.0037	0.2657	0.0054	
M2	2008	THC	Fator	0.0358	1.4751	2013.9993	0.1237	0.128
			Erro	0.0460	0.0040	0.2833	0.0052	
M3 FLEX ETANOL	2009	THC	Fator	0.1288	0.5052	2013.3397	0.2109	0.019
			Erro	0.0126	0.0016	0.1883	0.0117	
M3 FLEX ETANOL	2010	THC	Fator	0.1203	0.5041	2014.4408	0.2067	0.019
			Erro	0.0099	0.0009	0.1501	0.0087	
M3 FLEX ETANOL	2011	THC	Fator	0.1252	0.5041	2015.4048	0.2102	0.019
			Erro	0.0099	0.0009	0.1505	0.0091	
M3 FLEX ETANOL	2012	THC	Fator	0.1385	0.5040	2016.2561	0.2187	0.019
			Erro	0.0090	0.0008	0.1364	0.0089	
M3 FLEX ETANOL	2013	THC	Fator	0.1024	0.5043	2017.5977	0.1953	0.019
			Erro	0.0105	0.0009	0.1587	0.0081	
M3 FLEX ETANOL	2014	THC	Fator	0.1024	0.5043	2018.5977	0.1953	0.019
			Erro	0.0105	0.0009	0.1587	0.0081	
M3 FLEX ETANOL	2015	THC	Fator	0.0904	0.5035	2019.7221	0.1893	0.019
			Erro	0.0113	0.0010	0.1714	0.0082	
M3 GASOLINA	2009	THC	Fator	0.1293	0.4486	2014.1914	0.1615	0.020
			Erro	0.0091	0.0008	0.2021	0.0067	
M3 FLEX GASOLINA	2009 FLEX	THC	Fator	0.1159	0.4155	2014.6078	0.1413	0.020
			Erro	0.0090	0.0008	0.2391	0.0059	
M3 GASOLINA	2010	THC	Fator	0.1296	0.4233	2015.5395	0.1452	0.020
			Erro	0.0089	0.0008	0.2351	0.0062	
M3 FLEX GASOLINA	2010 FLEX	THC	Fator	0.1159	0.4155	2015.6078	0.1413	0.020
			Erro	0.0090	0.0008	0.2391	0.0059	
M3 GASOLINA	2011	THC	Fator	0.1420	0.4307	2016.4575	0.1483	0.020
			Erro	0.0085	0.0007	0.2247	0.0062	
M3 FLEX GASOLINA	2011 FLEX	THC	Fator	0.1025	0.4079	2016.6777	0.1379	0.020
			Erro	0.0092	0.0008	0.2453	0.0058	
M3 GASOLINA	2012	THC	Fator	0.1551	0.4382	2017.3818	0.1520	0.020
			Erro	0.0082	0.0007	0.2178	0.0064	
M3 FLEX GASOLINA	2012 FLEX	THC	Fator	0.1025	0.4079	2017.6777	0.1379	0.020
			Erro	0.0092	0.0008	0.2453	0.0058	
M3 GASOLINA	2013	THC	Fator	0.1186	0.4170	2018.5947	0.1421	0.020
			Erro	0.0090	0.0008	0.2383	0.0060	
M3 FLEX GASOLINA	2013 FLEX	THC	Fator	0.0928	0.4022	2018.7355	0.1356	0.020
			Erro	0.0095	0.0008	0.2527	0.0057	
M3 GASOLINA	2014	THC	Fator	0.1182	0.4168	2019.5964	0.1420	0.020
			Erro	0.0090	0.0008	0.2384	0.0060	
M3 FLEX GASOLINA	2014 FLEX	THC	Fator	0.0923	0.4020	2019.7383	0.1355	0.020
			Erro	0.0095	0.0008	0.2530	0.0057	
M3 GASOLINA	2015	THC	Fator	0.0873	0.3990	2020.7711	0.1343	0.020
			Erro	0.0097	0.0008	0.2578	0.0057	
M3 FLEX GASOLINA	2015 FLEX	THC	Fator	0.0654	0.3868	2020.8725	0.1289	0.020
			Erro	0.0100	0.0009	0.2661	0.0054	

TABELA 43 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p	Ua
M1	2003	NOX	Fator	0.1278	161.8714	1760.2534	-0.0160	0.010
			Erro	0.0007	334095.1229	56217.5102	0.0035	
M1	2004	NOX	Fator	0.1578	162.0005	1760.7057	-0.0159	0.010
			Erro	0.0007	336293.3122	56680.9247	0.0035	
M1	2005	NOX	Fator	0.1369	175.3503	1773.0547	-0.0168	0.010
			Erro	0.0006	341790.6282	50533.8233	0.0033	
M2	2006	NOX	Fator	0.1564	1.5433	2011.8537	0.1299	0.008
			Erro	0.0430	0.0037	0.2641	0.0054	
M2	2007	NOX	Fator	0.1564	1.5433	2011.8537	0.1299	0.008
			Erro	0.0430	0.0037	0.2641	0.0054	
M2	2008	NOX	Fator	0.1564	1.5433	2011.8537	0.1299	0.008
			Erro	0.0430	0.0037	0.2641	0.0054	
M3 FLEX ETANOL	2009	NOX	Fator	0.0540	0.1792	2014.7356	0.1356	0.005
			Erro	0.0038	0.0003	0.2527	0.0057	
M3 FLEX ETANOL	2010	NOX	Fator	0.0540	0.1792	2015.7356	0.1356	0.005
			Erro	0.0038	0.0003	0.2527	0.0057	
M3 FLEX ETANOL	2011	NOX	Fator	0.0425	0.1728	2016.8770	0.1287	0.005
			Erro	0.0041	0.0003	0.2666	0.0054	
M3 FLEX ETANOL	2012	NOX	Fator	0.0194	0.1599	2018.1547	0.1165	0.005
			Erro	0.0046	0.0004	0.3050	0.0049	
M3 FLEX ETANOL	2013	NOX	Fator	0.0194	0.1599	2019.1547	0.1165	0.005
			Erro	0.0046	0.0004	0.3050	0.0049	
M3 FLEX ETANOL	2014	NOX	Fator	0.0194	0.1599	2020.1547	0.1165	0.005
			Erro	0.0046	0.0004	0.3050	0.0049	
M3 FLEX ETANOL	2015	NOX	Fator	0.0858	0.1975	2020.3002	0.1571	0.005
			Erro	0.0033	0.0003	0.2148	0.0068	
M3 GASOLINA	2009	NOX	Fator	0.0875	0.1983	2014.2806	0.1579	0.010
			Erro	0.0032	0.0003	0.2125	0.0068	
M3 FLEX GASOLINA	2009 FLEX	NOX	Fator	0.0310	0.1661	2015.0280	0.1220	0.010
			Erro	0.0043	0.0004	0.2855	0.0051	
M3 GASOLINA	2010	NOX	Fator	0.0540	0.1790	2015.7468	0.1352	0.010
			Erro	0.0039	0.0003	0.2543	0.0057	
M3 FLEX GASOLINA	2010 FLEX	NOX	Fator	0.0310	0.1661	2016.0280	0.1220	0.010
			Erro	0.0043	0.0004	0.2855	0.0051	
M3 GASOLINA	2011	NOX	Fator	0.0652	0.1854	2016.5932	0.1422	0.010
			Erro	0.0036	0.0003	0.2382	0.0060	
M3 FLEX GASOLINA	2011 FLEX	NOX	Fator	0.0425	0.1725	2016.8870	0.1283	0.010
			Erro	0.0041	0.0003	0.2678	0.0053	
M3 GASOLINA	2012	NOX	Fator	0.0652	0.1854	2017.5932	0.1422	0.010
			Erro	0.0036	0.0003	0.2382	0.0060	
M3 FLEX GASOLINA	2012 FLEX	NOX	Fator	0.0193	0.1597	2018.1637	0.1160	0.010
			Erro	0.0046	0.0004	0.3061	0.0049	
M3 GASOLINA	2013	NOX	Fator	0.0425	0.1725	2018.8870	0.1283	0.010
			Erro	0.0041	0.0003	0.2678	0.0053	
M3 FLEX GASOLINA	2013 FLEX	NOX	Fator	0.0310	0.1661	2019.0280	0.1220	0.010
			Erro	0.0043	0.0004	0.2855	0.0051	
M3 GASOLINA	2014	NOX	Fator	0.0425	0.1725	2019.8870	0.1283	0.010
			Erro	0.0041	0.0003	0.2678	0.0053	
M3 FLEX GASOLINA	2014 FLEX	NOX	Fator	0.0310	0.1661	2020.0280	0.1220	0.010
			Erro	0.0043	0.0004	0.2855	0.0051	
M3 GASOLINA	2015	NOX	Fator	0.0826	0.1955	2020.3453	0.1541	0.010
			Erro	0.0033	0.0003	0.2157	0.0065	
M3 FLEX GASOLINA	2015 FLEX	NOX	Fator	0.0669	0.1864	2020.5738	0.1434	0.010
			Erro	0.0036	0.0003	0.2375	0.0061	

## B) VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS

TABELA 44 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>-  
VEÍCULOS MOVIDOS A GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	NOX	Fator	1.3033	1.4029	1985.5755	-0.1883
			Erro	0.0005	0.0036	0.2416	0.0128
PP	1981	NOX	Fator	1.3024	1.4010	1986.8609	-0.1967
			Erro	0.0005	0.0032	0.2146	0.0131
PP	1982	NOX	Fator	1.3024	1.4005	1988.0148	-0.2042
			Erro	0.0005	0.0028	0.1907	0.0129
PP	1983	NOX	Fator	1.3017	1.4005	1989.0234	-0.2080
			Erro	0.0005	0.0027	0.1774	0.0126
PP	1984	NOX	Fator	1.4873	1.6008	1989.9364	-0.2093
			Erro	0.0005	0.0030	0.1683	0.0121
PP	1985	NOX	Fator	1.4874	1.6014	1990.7969	-0.2089
			Erro	0.0005	0.0029	0.1605	0.0113
PP	1986	NOX	Fator	1.7670	1.9039	1991.6081	-0.2073
			Erro	0.0005	0.0033	0.1535	0.0104
PP	1987	NOX	Fator	1.7666	1.9065	1992.3110	-0.2026
			Erro	0.0005	0.0036	0.1586	0.0098
L1	1988	NOX	Fator	1.6737	1.8090	1992.9544	-0.1974
			Erro	0.0004	0.0037	0.1681	0.0094
L1	1989	NOX	Fator	1.4883	1.6035	1994.0000	-0.2090
			Erro	0.0004	0.0012	0.0000	0.0069
L1	1990	NOX	Fator	1.3027	1.4162	1994.0000	-0.1817
			Erro	0.0003	0.0010	0.0000	0.0044
L1	1991	NOX	Fator	1.2101	1.3302	1994.0000	-0.1612
			Erro	0.0003	0.0011	0.0000	0.0037
L2	1992	NOX	Fator	0.5479	0.9988	2003.2652	0.0696
			Erro	0.0087	0.0021	0.2719	0.0022
L2	1993	NOX	Fator	0.7566	1.1990	2004.6724	0.0712
			Erro	0.0087	0.0023	0.2743	0.0024
L2	1994	NOX	Fator	0.6664	1.1020	2006.2006	0.0740
			Erro	0.0081	0.0023	0.2578	0.0025
L2	1995	NOX	Fator	0.5741	1.0043	2007.6737	0.0771
			Erro	0.0075	0.0024	0.2383	0.0027
L2	1996	NOX	Fator	0.4785	0.9036	2008.9911	0.0799
			Erro	0.0070	0.0024	0.2226	0.0027
L3	1997	NOX	Fator	0.1240	0.7641	2004.1620	0.0600
			Erro	0.0123	0.0014	0.2893	0.0012
L3	1998	NOX	Fator	0.0841	0.6820	2006.1037	0.0626
			Erro	0.0115	0.0016	0.2830	0.0014
L3	1999	NOX	Fator	0.1011	0.6730	2007.7103	0.0645
			Erro	0.0117	0.0018	0.2962	0.0016
L3	2000	NOX	Fator	0.0901	0.6470	2009.0488	0.0655
			Erro	0.0112	0.0018	0.2900	0.0017
L3	2001	NOX	Fator	0.0236	0.5735	2010.1984	0.0658
			Erro	0.0112	0.0019	0.2924	0.0017
L3	2002	NOX	Fator	0.0044	0.5513	2011.2437	0.0657
			Erro	0.0114	0.0019	0.2990	0.0018
L3	2003	NOX	Fator	0.0036	0.5486	2012.2084	0.0654
			Erro	0.0115	0.0019	0.3044	0.0018

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2004	NOX	Fator	-0.0285	0.5134	2013.0894	0.0648
			Erro	0.0117	0.0019	0.3132	0.0018
L4	2005	NOX	Fator	0.0421	0.3405	2015.0790	0.0667
			Erro	0.0028	0.0006	0.1309	0.0009
L4	2006	NOX	Fator	0.0091	0.3077	2015.3669	0.0633
			Erro	0.0034	0.0006	0.1648	0.0009
L4	2007	NOX	Fator	0.0108	0.3087	2016.5026	0.0635
			Erro	0.0035	0.0006	0.1704	0.0010
L4	2008	NOX	Fator	-0.0032	0.2970	2018.2258	0.0657
			Erro	0.0037	0.0007	0.1791	0.0012
L5	2009	NOX	Fator	-0.0699	0.3249	2016.7628	0.0576
			Erro	0.0099	0.0013	0.3909	0.0016
L5	2010	NOX	Fator	-0.0634	0.3290	2017.6675	0.0573
			Erro	0.0101	0.0013	0.4001	0.0016
L5	2011	NOX	Fator	-0.0588	0.3291	2019.1318	0.0584
			Erro	0.0097	0.0014	0.3858	0.0016
L5	2012	NOX	Fator	-0.0627	0.3226	2019.8602	0.0578
			Erro	0.0097	0.0013	0.3890	0.0016
L5	2013	NOX	Fator	-0.0605	0.3233	2021.5765	0.0595
			Erro	0.0092	0.0014	0.3648	0.0017
L6	2014	NOX	Fator	-0.0767	0.3034	2021.3892	0.0570
			Erro	0.0090	0.0011	0.3673	0.0014
L6	2015	NOX	Fator	-0.0682	0.3096	2022.5028	0.0573
			Erro	0.0085	0.0011	0.3507	0.0014
L6	2016	NOX	Fator	-0.0684	0.3093	2023.5188	0.0573
			Erro	0.0085	0.0011	0.3503	0.0014

TABELA 45 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>-VEÍCULOS FLEX FUEL GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	NOX	Fator	-0.0764	0.4686	2012.2084	0.0654
			Erro	0.0115	0.0019	0.3044	0.0018
L3	2004	NOX	Fator	-0.0685	0.4734	2013.0894	0.0648
			Erro	0.0117	0.0019	0.3132	0.0018
L4	2005	NOX	Fator	-0.0011	0.3017	2014.9857	0.0653
			Erro	0.0034	0.0007	0.1634	0.0010
L4	2006	NOX	Fator	-0.0139	0.2847	2015.3669	0.0633
			Erro	0.0034	0.0006	0.1648	0.0009
L4	2007	NOX	Fator	-0.0122	0.2857	2016.5026	0.0635
			Erro	0.0035	0.0006	0.1704	0.0010
L4	2008	NOX	Fator	-0.0092	0.2910	2018.2258	0.0657
			Erro	0.0037	0.0007	0.1791	0.0012
L5	2009	NOX	Fator	-0.0639	0.3309	2016.7628	0.0576
			Erro	0.0099	0.0013	0.3909	0.0016
L5	2010	NOX	Fator	-0.0614	0.3310	2017.6675	0.0573
			Erro	0.0101	0.0013	0.4001	0.0016

continua



conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L5	2011	NOX	Fator	-0.0548	0.3331	2019.1318	0.0584
			Erro	0.0097	0.0014	0.3858	0.0016
L5	2012	NOX	Fator	-0.0597	0.3256	2019.8602	0.0578
			Erro	0.0097	0.0013	0.3890	0.0016
L5	2013	NOX	Fator	-0.0505	0.3333	2021.5765	0.0595
			Erro	0.0092	0.0014	0.3648	0.0017
L6	2014	NOX	Fator	-0.0717	0.3084	2021.3892	0.0570
			Erro	0.0090	0.0011	0.3673	0.0014
L6	2015	NOX	Fator	-0.0752	0.3026	2022.5028	0.0573
			Erro	0.0085	0.0011	0.3507	0.0014
L6	2016	NOX	Fator	-0.0754	0.3023	2023.5188	0.0573
			Erro	0.0085	0.0011	0.3503	0.0014

TABELA 46 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>-VEÍCULOS DEDICADOS A ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	NOX	Fator	0.8810	1.0181	1984.0045	-0.1719
			Erro	0.0005	0.0064	0.2969	0.0101
PP	1981	NOX	Fator	0.8833	1.0159	1985.2359	-0.1783
			Erro	0.0004	0.0052	0.2468	0.0096
PP	1982	NOX	Fator	0.8814	1.0167	1986.1985	-0.1770
			Erro	0.0004	0.0054	0.2517	0.0095
PP	1983	NOX	Fator	0.8815	1.0171	1987.1915	-0.1755
			Erro	0.0004	0.0056	0.2602	0.0096
PP	1984	NOX	Fator	1.0576	1.2203	1988.2425	-0.1736
			Erro	0.0006	0.0070	0.2744	0.0099
PP	1985	NOX	Fator	1.0574	1.2183	1989.3821	-0.1729
			Erro	0.0006	0.0071	0.2858	0.0104
PP	1986	NOX	Fator	1.5870	1.8239	1990.5634	-0.1765
			Erro	0.0009	0.0100	0.2727	0.0108
PP	1987	NOX	Fator	1.5858	1.8209	1991.6828	-0.1792
			Erro	0.0009	0.0096	0.2629	0.0110
L1	1988	NOX	Fator	1.2332	1.4136	1992.8021	-0.1829
			Erro	0.0007	0.0069	0.2437	0.0109
L1	1989	NOX	Fator	0.9695	1.1065	1994.0000	-0.1949
			Erro	0.0005	0.0016	0.0000	0.0070
L1	1990	NOX	Fator	1.0569	1.2287	1994.0000	-0.1702
			Erro	0.0006	0.0019	0.0000	0.0051
L1	1991	NOX	Fator	0.8808	1.0462	1994.0000	-0.1501
			Erro	0.0005	0.0020	0.0000	0.0044
L2	1992	NOX	Fator	0.4935	0.7877	2006.3062	0.0956
			Erro	0.0047	0.0021	0.2169	0.0041
L2	1993	NOX	Fator	0.5936	0.8893	2007.2900	0.0951
			Erro	0.0047	0.0021	0.2184	0.0041
L2	1994	NOX	Fator	0.6952	0.9903	2008.4890	0.0951
			Erro	0.0045	0.0021	0.2091	0.0039

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L2	1995	NOX	Fator	0.6962	0.9931	2009.6200	0.0960
			Erro	0.0045	0.0021	0.2077	0.0040
L2	1996	NOX	Fator	0.6960	0.9949	2010.6335	0.0967
			Erro	0.0046	0.0022	0.2116	0.0042
L3	1997	NOX	Fator	0.2883	0.4606	2008.9689	0.0742
			Erro	0.0032	0.0009	0.2580	0.0025
L3	1998	NOX	Fator	0.2290	0.3998	2010.1157	0.0748
			Erro	0.0031	0.0009	0.2502	0.0025
L3	1999	NOX	Fator	0.2089	0.3795	2011.2251	0.0755
			Erro	0.0031	0.0009	0.2470	0.0025
L3	2000	NOX	Fator	0.1984	0.3692	2012.2756	0.0755
			Erro	0.0031	0.0009	0.2527	0.0026
L3	2001	NOX	Fator	0.0685	0.2389	2013.2875	0.0751
			Erro	0.0032	0.0009	0.2595	0.0027
L3	2002	NOX	Fator	0.0691	0.2385	2014.3478	0.0751
			Erro	0.0031	0.0009	0.2560	0.0026
L3	2003	NOX	Fator	0.0794	0.2469	2015.3710	0.0748
			Erro	0.0030	0.0009	0.2490	0.0025
L3	2004	NOX	Fator	0.0693	0.2328	2016.3330	0.0743
			Erro	0.0028	0.0008	0.2351	0.0024
L4	2005	NOX	Fator	0.0685	0.2326	2017.3226	0.0739
			Erro	0.0027	0.0008	0.2308	0.0023
L4	2006	NOX	Fator	0.0365	0.1915	2017.8198	0.0712
			Erro	0.0027	0.0007	0.2467	0.0022

TABELA 47 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>-VEÍCULOS FLEX FUEL ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	NOX	Fator	0.1098	0.3526	2013.8077	0.0680
			Erro	0.0041	0.0009	0.2385	0.0018
L3	2004	NOX	Fator	0.1080	0.3484	2014.5930	0.0668
			Erro	0.0040	0.0008	0.2357	0.0016
L4	2005	NOX	Fator	0.0888	0.2522	2017.4316	0.0746
			Erro	0.0027	0.0008	0.2260	0.0023
L4	2006	NOX	Fator	0.0475	0.2035	2017.8616	0.0715
			Erro	0.0027	0.0007	0.2417	0.0022
L4	2007	NOX	Fator	0.0483	0.2047	2018.9954	0.0720
			Erro	0.0027	0.0007	0.2404	0.0022
L4	2008	NOX	Fator	0.0388	0.2024	2020.6250	0.0756
			Erro	0.0027	0.0008	0.2286	0.0024
L5	2009	NOX	Fator	0.0102	0.2191	2020.4327	0.0692
			Erro	0.0039	0.0010	0.2668	0.0021
L5	2010	NOX	Fator	0.0170	0.2235	2021.3486	0.0688
			Erro	0.0040	0.0010	0.2716	0.0021
L5	2011	NOX	Fator	0.0120	0.2201	2022.6513	0.0702
			Erro	0.0039	0.0010	0.2623	0.0022
L5	2012	NOX	Fator	0.0090	0.2130	2023.4260	0.0692
			Erro	0.0039	0.0010	0.2672	0.0022

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L5	2013	NOX	Fator	0.0059	0.2157	2024.9266	0.0717
			Erro	0.0038	0.0010	0.2519	0.0023
L6	2014	NOX	Fator	-0.0043	0.1928	2024.9802	0.0675
			Erro	0.0037	0.0008	0.2682	0.0020
L6	2015	NOX	Fator	-0.0062	0.1906	2026.0366	0.0678
			Erro	0.0036	0.0008	0.2617	0.0020
L6	2016	NOX	Fator	-0.0063	0.1905	2027.0478	0.0679
			Erro	0.0036	0.0008	0.2614	0.0020

TABELA 48 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	CO	Fator	33.2358	43.2017	1985.5755	0.1883
			Erro	0.3631	0.0494	0.2416	0.0128
PP	1981	CO	Fator	33.4140	45.5066	1986.8609	0.1967
			Erro	0.3921	0.0607	0.2146	0.0131
PP	1982	CO	Fator	33.4630	45.5045	1988.0148	0.2042
			Erro	0.3490	0.0586	0.1907	0.0129
PP	1983	CO	Fator	33.3838	45.5026	1989.0234	0.2080
			Erro	0.3293	0.0565	0.1774	0.0126
PP	1984	CO	Fator	28.2704	38.6061	1989.9364	0.2093
			Erro	0.2690	0.0453	0.1683	0.0121
PP	1985	CO	Fator	28.2196	38.6036	1990.7969	0.2089
			Erro	0.2604	0.0421	0.1605	0.0113
PP	1986	CO	Fator	22.0828	30.3297	1991.6081	0.2073
			Erro	0.2001	0.0304	0.1535	0.0104
PP	1987	CO	Fator	21.8941	30.3290	1992.3110	0.2026
			Erro	0.2139	0.0290	0.1586	0.0098
L1	1988	CO	Fator	18.2646	25.5031	1992.9544	0.1974
			Erro	0.1970	0.0232	0.1681	0.0094
L1	1989	CO	Fator	15.2570	20.9519	1994.0000	0.2090
			Erro	0.0605	0.0188	0.0000	0.0069
L1	1990	CO	Fator	12.7232	18.3343	1994.0000	0.1817
			Erro	0.0499	0.0144	0.0000	0.0044
L1	1991	CO	Fator	10.3310	15.8575	1994.0000	0.1612
			Erro	0.0507	0.0134	0.0000	0.0037
L2	1992	CO	Fator	5.9340	9.7226	2004.4925	0.0756
			Erro	0.0659	0.0200	0.2400	0.0025
L2	1993	CO	Fator	6.0828	9.8141	2005.7573	0.0771
			Erro	0.0660	0.0211	0.2431	0.0027
L2	1994	CO	Fator	5.8393	9.5741	2007.1738	0.0801
			Erro	0.0636	0.0220	0.2330	0.0029
L2	1995	CO	Fator	4.5788	8.3157	2008.5131	0.0831
			Erro	0.0611	0.0227	0.2230	0.0031
L2	1996	CO	Fator	3.6964	7.4421	2009.7351	0.0857
			Erro	0.0595	0.0233	0.2159	0.0032
L3	1997	CO	Fator	0.4085	4.2222	2005.7756	0.0629
			Erro	0.0633	0.0098	0.2443	0.0013

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	1998	CO	Fator	0.1318	3.7536	2007.5266	0.0653
			Erro	0.0467	0.0082	0.1861	0.0011
L3	1999	CO	Fator	0.1454	3.6612	2008.9751	0.0671
			Erro	0.0454	0.0087	0.1840	0.0012
L3	2000	CO	Fator	0.1669	3.6225	2010.2230	0.0680
			Erro	0.0442	0.0088	0.1813	0.0013
L3	2001	CO	Fator	-0.0724	3.3552	2011.3308	0.0682
			Erro	0.0442	0.0090	0.1823	0.0013
L3	2002	CO	Fator	-0.1219	3.2942	2012.3642	0.0682
			Erro	0.0443	0.0091	0.1836	0.0013
L3	2003	CO	Fator	-0.1537	3.2562	2013.3741	0.0679
			Erro	0.0435	0.0089	0.1809	0.0013
L3	2004	CO	Fator	-0.2076	3.1886	2014.3550	0.0675
			Erro	0.0413	0.0085	0.1731	0.0012
L4	2005	CO	Fator	-0.0859	2.9570	2015.8196	0.0698
			Erro	0.0283	0.0070	0.1278	0.0010
L4	2006	CO	Fator	-0.1459	2.9491	2016.8462	0.0684
			Erro	0.0352	0.0079	0.1612	0.0012
L4	2007	CO	Fator	-0.1367	2.9517	2017.9136	0.0686
			Erro	0.0358	0.0081	0.1643	0.0012
L4	2008	CO	Fator	-0.0790	2.9619	2018.7683	0.0679
			Erro	0.0364	0.0081	0.1703	0.0013
L5	2009	CO	Fator	0.0542	1.9115	2021.0913	0.0724
			Erro	0.0329	0.0092	0.2469	0.0023
L5	2010	CO	Fator	0.0547	1.8800	2021.9498	0.0717
			Erro	0.0330	0.0090	0.2527	0.0023
L5	2011	CO	Fator	0.1274	1.9377	2022.9430	0.0717
			Erro	0.0328	0.0089	0.2533	0.0023
L5	2012	CO	Fator	0.1240	1.9110	2023.8683	0.0714
			Erro	0.0323	0.0087	0.2536	0.0023
L5	2013	CO	Fator	0.0913	1.8675	2024.8979	0.0716
			Erro	0.0316	0.0086	0.2488	0.0022
L6	2014	CO	Fator	0.0697	1.8314	2025.8775	0.0716
			Erro	0.0307	0.0083	0.2439	0.0022
L6	2015	CO	Fator	0.0248	1.7853	2026.9210	0.0719
			Erro	0.0302	0.0082	0.2394	0.0022
L6	2016	CO	Fator	0.0234	1.7849	2027.9303	0.0720
			Erro	0.0302	0.0082	0.2392	0.0022

TABELA 49 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS FLEX FUEL GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	CO	Fator	-0.0537	3.3562	2013.3741	0.0679
			Erro	0.0435	0.0089	0.1809	0.0013
L3	2004	CO	Fator	-0.1676	3.2286	2014.3550	0.0675
			Erro	0.0413	0.0085	0.1731	0.0012
L4	2005	CO	Fator	-0.0070	3.0821	2015.7444	0.0682
			Erro	0.0348	0.0077	0.1600	0.0012

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L4	2006	CO	Fator	0.0612	3.1561	2016.8462	0.0684
			Erro	0.0352	0.0079	0.1612	0.0012
L4	2007	CO	Fator	0.0703	3.1587	2017.9136	0.0686
			Erro	0.0358	0.0081	0.1643	0.0012
L4	2008	CO	Fator	0.0711	3.1119	2018.7683	0.0679
			Erro	0.0364	0.0081	0.1703	0.0013
L5	2009	CO	Fator	0.1722	2.0295	2021.0913	0.0724
			Erro	0.0329	0.0092	0.2469	0.0023
L5	2010	CO	Fator	0.1297	1.9550	2021.9498	0.0717
			Erro	0.0330	0.0090	0.2527	0.0023
L5	2011	CO	Fator	0.1344	1.9447	2022.9430	0.0717
			Erro	0.0328	0.0089	0.2533	0.0023
L5	2012	CO	Fator	0.1180	1.9050	2023.8683	0.0714
			Erro	0.0323	0.0087	0.2536	0.0023
L5	2013	CO	Fator	0.0813	1.8575	2024.8979	0.0716
			Erro	0.0316	0.0086	0.2488	0.0022
L6	2014	CO	Fator	0.0827	1.8444	2025.8775	0.0716
			Erro	0.0307	0.0083	0.2439	0.0022
L6	2015	CO	Fator	0.0748	1.8353	2026.9210	0.0719
			Erro	0.0302	0.0082	0.2394	0.0022
L6	2016	CO	Fator	0.0734	1.8349	2027.9303	0.0720
			Erro	0.0302	0.0082	0.2392	0.0022

TABELA 50 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS DEDICADOS A ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	CO	Fator	17.2409	26.0704	1984.0045	0.1719
			Erro	0.4145	0.0304	0.2969	0.0101
PP	1981	CO	Fator	17.5260	26.0678	1985.2359	0.1783
			Erro	0.3366	0.0278	0.2468	0.0096
PP	1982	CO	Fator	17.3530	26.0686	1986.1985	0.1770
			Erro	0.3494	0.0283	0.2517	0.0095
PP	1983	CO	Fator	17.3314	26.0692	1987.1915	0.1755
			Erro	0.3602	0.0288	0.2602	0.0096
PP	1984	CO	Fator	16.2809	24.4775	1988.2425	0.1736
			Erro	0.3526	0.0285	0.2744	0.0099
PP	1985	CO	Fator	16.3705	24.4791	1989.3821	0.1729
			Erro	0.3592	0.0304	0.2858	0.0104
PP	1986	CO	Fator	15.6407	23.1757	1990.5634	0.1765
			Erro	0.3191	0.0293	0.2727	0.0108
PP	1987	CO	Fator	15.6968	23.1758	1991.6828	0.1792
			Erro	0.3060	0.0297	0.2629	0.0110
L1	1988	CO	Fator	13.1323	19.2641	1992.8021	0.1829
			Erro	0.2337	0.0241	0.2437	0.0109
L1	1989	CO	Fator	12.8311	18.5373	1994.0000	0.1949
			Erro	0.0674	0.0211	0.0000	0.0070
L1	1990	CO	Fator	12.4537	19.2663	1994.0000	0.1702
			Erro	0.0755	0.0221	0.0000	0.0051
L1	1991	CO	Fator	7.2031	12.1741	1994.0000	0.1501
			Erro	0.0591	0.0159	0.0000	0.0044

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L2	1992	CO	Fator	3.5284	6.6466	2006.1679	0.0940
			Erro	0.0498	0.0216	0.2165	0.0039
L2	1993	CO	Fator	4.1295	7.2388	2007.1316	0.0932
			Erro	0.0500	0.0215	0.2183	0.0039
L2	1994	CO	Fator	4.5469	7.6644	2008.3453	0.0934
			Erro	0.0476	0.0212	0.2090	0.0038
L2	1995	CO	Fator	4.5587	7.6935	2009.4836	0.0943
			Erro	0.0474	0.0216	0.2073	0.0038
L2	1996	CO	Fator	3.8570	7.0247	2010.5149	0.0952
			Erro	0.0488	0.0225	0.2109	0.0040
L3	1997	CO	Fator	0.6800	2.8198	2007.9164	0.0692
			Erro	0.0448	0.0102	0.2953	0.0023
L3	1998	CO	Fator	0.4636	2.5783	2009.1013	0.0698
			Erro	0.0424	0.0100	0.2821	0.0022
L3	1999	CO	Fator	0.3972	2.5004	2010.2482	0.0705
			Erro	0.0412	0.0099	0.2748	0.0023
L3	2000	CO	Fator	0.4213	2.5238	2011.3037	0.0704
			Erro	0.0424	0.0103	0.2826	0.0023
L3	2001	CO	Fator	0.4512	2.5500	2012.3072	0.0701
			Erro	0.0437	0.0106	0.2928	0.0024
L3	2002	CO	Fator	0.5413	2.6252	2013.3791	0.0700
			Erro	0.0427	0.0105	0.2882	0.0024
L3	2003	CO	Fator	0.5811	2.6496	2014.4799	0.0702
			Erro	0.0407	0.0102	0.2767	0.0023
L3	2004	CO	Fator	0.6405	2.6826	2015.6104	0.0705
			Erro	0.0368	0.0095	0.2532	0.0022
L4	2005	CO	Fator	0.7006	2.5346	2017.4890	0.0749
			Erro	0.0301	0.0091	0.2272	0.0023
L4	2006	CO	Fator	0.5540	2.4018	2018.6083	0.0755
			Erro	0.0304	0.0094	0.2273	0.0024

TABELA 51 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE CO - VEÍCULOS FLEX FUEL ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	CO	Fator	0.3683	2.2722	2015.2628	0.0747
			Erro	0.0312	0.0091	0.2265	0.0023
L3	2004	CO	Fator	0.3166	2.2088	2016.2569	0.0742
			Erro	0.0303	0.0088	0.2218	0.0022
L4	2005	CO	Fator	0.1095	2.5628	2016.6018	0.0714
			Erro	0.0299	0.0077	0.1702	0.0015
L4	2006	CO	Fator	0.2187	2.6809	2017.7055	0.0717
			Erro	0.0304	0.0080	0.1722	0.0015
L4	2007	CO	Fator	0.2255	2.6845	2018.7712	0.0719
			Erro	0.0308	0.0082	0.1747	0.0016
L4	2008	CO	Fator	0.2839	2.6964	2019.6183	0.0711
			Erro	0.0308	0.0080	0.1787	0.0016
L5	2009	CO	Fator	0.4764	1.9710	2022.2125	0.0795
			Erro	0.0239	0.0083	0.2198	0.0027
L5	2010	CO	Fator	0.4387	1.8994	2023.1023	0.0787
			Erro	0.0237	0.0081	0.2229	0.0027

continua

conclusão

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L5	2011	CO	Fator	0.4196	1.8671	2024.0918	0.0787
			Erro	0.0235	0.0080	0.2234	0.0027
L5	2012	CO	Fator	0.4050	1.8295	2025.0281	0.0783
			Erro	0.0232	0.0078	0.2237	0.0026
L5	2013	CO	Fator	0.3563	1.7731	2026.0426	0.0785
			Erro	0.0228	0.0077	0.2211	0.0026
L5	2014	CO	Fator	0.3134	1.7173	2027.0187	0.0784
			Erro	0.0224	0.0075	0.2186	0.0026
L5	2015	CO	Fator	0.2876	1.6926	2028.0468	0.0787
			Erro	0.0221	0.0075	0.2163	0.0026
L5	2016	CO	Fator	0.2865	1.6928	2029.0532	0.0788
			Erro	0.0222	0.0075	0.2163	0.0026

TABELA 52 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	THC	Fator	3.0214	3.9236	1985.5755	0.18829
			Erro	0.0329	0.0045	0.2416	
PP	1981	THC	Fator	3.0306	3.9235	1986.8609	0.19674
			Erro	0.0290	0.0045	0.2146	
PP	1982	THC	Fator	3.0342	3.9234	1988.0148	0.2042
			Erro	0.0258	0.0043	0.1907	
PP	1983	THC	Fator	3.0283	3.9233	1989.0234	0.20796
			Erro	0.0243	0.0042	0.1774	
PP	1984	THC	Fator	2.4188	3.1385	1989.9364	0.20932
			Erro	0.0187	0.0032	0.1683	
PP	1985	THC	Fator	2.4153	3.1383	1990.7969	0.20888
			Erro	0.0181	0.0029	0.1605	
PP	1986	THC	Fator	2.0061	2.6151	1991.6081	0.20727
			Erro	0.0148	0.0022	0.1535	
PP	1987	THC	Fator	1.9922	2.6151	1992.3110	0.20255
			Erro	0.0158	0.0021	0.1586	
L1	1988	THC	Fator	1.6824	2.2227	1992.9544	0.19743
			Erro	0.0147	0.0017	0.1681	
L1	1989	THC	Fator	1.6049	2.0918	1994.0000	0.20897
			Erro	0.0052	0.0016	0.0000	
L1	1990	THC	Fator	1.3507	1.8305	1994.0000	0.1817
			Erro	0.0043	0.0012	0.0000	
L1	1991	THC	Fator	1.1927	1.7001	1994.0000	0.16124
			Erro	0.0047	0.0012	0.0000	
L2	1992	THC	Fator	0.3171	1.2936	1998.9656	0.05864
			Erro	0.0287	0.0033	0.4481	
L2	1993	THC	Fator	0.3464	1.2880	2000.5055	0.05923
			Erro	0.0263	0.0033	0.4235	
L2	1994	THC	Fator	0.3846	1.2778	2002.2563	0.06079
			Erro	0.0218	0.0031	0.3665	
L2	1995	THC	Fator	0.4235	1.2663	2004.1120	0.06316
			Erro	0.0170	0.0028	0.2969	
L2	1996	THC	Fator	0.2563	1.0548	2005.9364	0.06612
			Erro	0.0133	0.0026	0.2392	

continua



conclusão

L2	1996	THC	Fator	0.2563	1.0548	2005.9364	0.06612
			Erro	0.0133	0.0026	0.2392	
L3	1997	THC	Fator	0.1278	0.4851	2005.6306	0.06189
			Erro	0.0061	0.0009	0.2552	
L3	1998	THC	Fator	0.0787	0.4198	2007.3357	0.06424
			Erro	0.0048	0.0008	0.2067	
L3	1999	THC	Fator	0.0845	0.4161	2008.7742	0.06591
			Erro	0.0044	0.0008	0.1899	
L3	2000	THC	Fator	0.0771	0.4036	2010.0075	0.06671
			Erro	0.0042	0.0008	0.1832	
L3	2001	THC	Fator	0.0578	0.3821	2011.1051	0.06694
			Erro	0.0041	0.0008	0.1816	
L3	2002	THC	Fator	0.0577	0.3811	2012.1317	0.06681
			Erro	0.0041	0.0008	0.1807	
L3	2003	THC	Fator	0.0569	0.3792	2013.0731	0.06634
			Erro	0.0040	0.0008	0.1766	
L3	2004	THC	Fator	0.0561	0.3771	2014.0215	0.06583
			Erro	0.0037	0.0007	0.1672	
L4	2005	THC	Fator	0.0651	0.3260	2015.6606	0.06823
			Erro	0.0032	0.0008	0.1690	
L4	2006	THC	Fator	0.0340	0.3023	2017.0170	0.06834
			Erro	0.0037	0.0008	0.1949	
L4	2007	THC	Fator	0.0352	0.3034	2018.1309	0.0687
			Erro	0.0037	0.0009	0.1977	
L4	2008	THC	Fator	0.0214	0.2835	2018.7507	0.0671
			Erro	0.0038	0.0008	0.2051	
L5	2009	THC	Fator	0.0233	0.1552	2022.6327	0.0828
			Erro	0.0021	0.0008	0.2129	
L5	2010	THC	Fator	0.0274	0.1568	2023.5744	0.08233
			Erro	0.0020	0.0008	0.2145	
L5	2011	THC	Fator	0.0310	0.1546	2024.3505	0.08058
			Erro	0.0020	0.0007	0.2184	
L5	2012	THC	Fator	0.0231	0.1389	2024.9332	0.07761
			Erro	0.0019	0.0006	0.2257	
L5	2013	THC	Fator	0.0196	0.1374	2026.1207	0.07901
			Erro	0.0019	0.0006	0.2197	
L6	2014	THC	Fator	0.0155	0.1228	2026.3560	0.07341
			Erro	0.0024	0.0007	0.3052	
L6	2015	THC	Fator	0.0103	0.1206	2027.6438	0.07599
			Erro	0.0018	0.0006	0.2236	
L6	2016	THC	Fator	0.0102	0.1206	2028.6513	0.07606
			Erro	0.0018	0.0006	0.2235	

TABELA 53 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS FLEX GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	THC	Fator	-0.0031	0.3192	2013.0731	0.06634
			Erro	0.0040	0.0008	0.1766	
L3	2004	THC	Fator	0.0261	0.3471	2014.0215	0.06583
			Erro	0.0037	0.0007	0.1672	
L4	2005	THC	Fator	0.0729	0.3364	2015.5935	0.06688
			Erro	0.0036	0.0008	0.1930	

continua



conclusão

L4	2006	THC	Fator	0.0803	0.3476	2017.0286	0.06837
			Erro	0.0037	0.0009	0.1960	
L4	2007	THC	Fator	0.0815	0.3486	2018.1427	0.06873
			Erro	0.0037	0.0009	0.1987	
L4	2008	THC	Fator	0.0597	0.3207	2018.7615	0.06713
			Erro	0.0038	0.0008	0.2063	
L5	2009	THC	Fator	0.0323	0.1642	2022.6327	0.0828
			Erro	0.0021	0.0008	0.2129	
L5	2010	THC	Fator	0.0374	0.1668	2023.5744	0.08233
			Erro	0.0020	0.0008	0.2145	
L5	2011	THC	Fator	0.0360	0.1596	2024.3505	0.08058
			Erro	0.0020	0.0007	0.2184	
L5	2012	THC	Fator	0.0301	0.1459	2024.9332	0.07761
			Erro	0.0019	0.0006	0.2257	
L5	2013	THC	Fator	0.0246	0.1424	2026.1207	0.07901
			Erro	0.0019	0.0006	0.2197	
L5	2014	THC	Fator	0.0174	0.1276	2026.6103	0.0757
			Erro	0.0018	0.0006	0.2266	
L5	2015	THC	Fator	0.0143	0.1246	2027.6438	0.07599
			Erro	0.0018	0.0006	0.2236	
L5	2016	THC	Fator	0.0142	0.1246	2028.6513	0.07606
			Erro	0.0018	0.0006	0.2235	

TABELA 54 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	THC	Fator	1.5537	2.0923	1984.0045	0.17194
			Erro	0.0253	0.0019	0.2969	
PP	1981	THC	Fator	1.5711	2.0921	1985.2359	0.17826
			Erro	0.0205	0.0017	0.2468	
PP	1982	THC	Fator	1.5605	2.0921	1986.1985	0.17701
			Erro	0.0213	0.0017	0.2517	
PP	1983	THC	Fator	1.5592	2.0922	1987.1915	0.17547
			Erro	0.0220	0.0018	0.2602	
PP	1984	THC	Fator	1.5598	2.0923	1988.2425	0.17356
			Erro	0.0229	0.0019	0.2744	
PP	1985	THC	Fator	1.5656	2.0924	1989.3821	0.17291
			Erro	0.0233	0.0020	0.2858	
PP	1986	THC	Fator	1.5753	2.0924	1990.5634	0.17652
			Erro	0.0219	0.0020	0.2727	
PP	1987	THC	Fator	1.5792	2.0924	1991.6828	0.17923
			Erro	0.0210	0.0020	0.2629	
L1	1988	THC	Fator	1.6856	2.2142	1992.8021	0.1829
			Erro	0.0202	0.0021	0.2437	
L1	1989	THC	Fator	1.6026	2.0837	1994.0000	0.19486
			Erro	0.0057	0.0018	0.0000	
L1	1990	THC	Fator	1.2442	1.6933	1994.0000	0.17017
			Erro	0.0050	0.0015	0.0000	
L1	1991	THC	Fator	0.9943	1.4333	1994.0000	0.15009
			Erro	0.0052	0.0014	0.0000	
L2	1992	THC	Fator	0.5884	0.9416	2005.4908	0.08705
			Erro	0.0058	0.0022	0.2209	

continua

conclusão

L2	1993	THC	Fator	0.5885	0.9409	2006.4504	0.08633
			Erro	0.0059	0.0022	0.2247	
L2	1994	THC	Fator	0.6906	1.0363	2007.5833	0.0857
			Erro	0.0055	0.0021	0.2175	
L2	1995	THC	Fator	0.6924	1.0343	2008.6996	0.08609
			Erro	0.0054	0.0021	0.2150	
L2	1996	THC	Fator	0.5928	0.9351	2009.7617	0.087
			Erro	0.0055	0.0022	0.2158	
L3	1997	THC	Fator	0.2614	0.5195	2006.6046	0.06435
			Erro	0.0061	0.0011	0.3471	
L3	1998	THC	Fator	0.1539	0.4079	2007.8383	0.065
			Erro	0.0057	0.0011	0.3261	
L3	1999	THC	Fator	0.1350	0.3865	2009.0298	0.06564
			Erro	0.0055	0.0011	0.3133	
L3	2000	THC	Fator	0.1444	0.3955	2010.0847	0.06556
			Erro	0.0056	0.0011	0.3248	
L3	2001	THC	Fator	0.1142	0.3650	2011.0718	0.06514
			Erro	0.0059	0.0012	0.3408	
L3	2002	THC	Fator	0.1257	0.3745	2012.1582	0.06516
			Erro	0.0057	0.0011	0.3349	
L3	2003	THC	Fator	0.1267	0.3726	2013.1943	0.06503
			Erro	0.0055	0.0011	0.3229	
L3	2004	THC	Fator	0.1382	0.3802	2014.3338	0.06534
			Erro	0.0048	0.0010	0.2893	
L4	2005	THC	Fator	0.1414	0.3774	2015.6827	0.06738
			Erro	0.0044	0.0011	0.2625	
L4	2006	THC	Fator	0.0930	0.3356	2017.1037	0.06795
			Erro	0.0045	0.0011	0.2662	

TABELA 55 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE THC - VEÍCULOS FLEX FUEL ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	THC	Fator	0.1021	0.3934	2012.6924	0.06408
			Erro	0.0049	0.0009	0.2464	
L3	2004	THC	Fator	0.0961	0.3781	2014.0420	0.0652
			Erro	0.0039	0.0008	0.2012	
L4	2005	THC	Fator	0.1109	0.3476	2015.5685	0.06676
			Erro	0.0048	0.0011	0.2872	
L4	2006	THC	Fator	0.0987	0.3417	2017.0076	0.06741
			Erro	0.0049	0.0011	0.2858	
L4	2007	THC	Fator	0.1001	0.3428	2018.1406	0.06787
			Erro	0.0048	0.0011	0.2838	
L4	2008	THC	Fator	0.0856	0.3231	2018.6677	0.06589
			Erro	0.0051	0.0011	0.3068	
L5	2009	THC	Fator	0.0544	0.2602	2020.2714	0.06842
			Erro	0.0040	0.0010	0.2751	
L5	2010	THC	Fator	0.0713	0.2746	2021.1915	0.06807
			Erro	0.0040	0.0010	0.2801	
L5	2011	THC	Fator	0.0674	0.2663	2021.8323	0.06662
			Erro	0.0040	0.0009	0.2924	
L5	2012	THC	Fator	0.0626	0.2564	2022.1743	0.06424
			Erro	0.0041	0.0008	0.3115	

continua

conclusão

L5	2013	THC	Fator	0.0581	0.2516	2023.5270	0.06559
			Erro	0.0039	0.0008	0.2913	
L6	2014	THC	Fator	0.0435	0.2325	2023.7585	0.06306
			Erro	0.0039	0.0007	0.3036	
L6	2015	THC	Fator	0.0508	0.2392	2024.8367	0.06339
			Erro	0.0038	0.0007	0.2938	
L6	2016	THC	Fator	0.0507	0.2391	2025.8505	0.06345
			Erro	0.0038	0.0007	0.2934	

TABELA 56 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS - VEÍCULOS GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	NOX	Fator	0.0503	0.0628	1985.5755	0.1883
			Erro	0.0005	0.0001	0.2416	0.0128
PP	1981	NOX	Fator	0.0504	0.0628	1986.8609	0.1967
			Erro	0.0004	0.0001	0.2146	0.0131
PP	1982	NOX	Fator	0.0505	0.0628	1988.0148	0.2042
			Erro	0.0004	0.0001	0.1907	0.0129
PP	1983	NOX	Fator	0.0504	0.0628	1989.0234	0.2080
			Erro	0.0003	0.0001	0.1774	0.0126
PP	1984	NOX	Fator	0.0503	0.0628	1989.9364	0.2093
			Erro	0.0003	0.0001	0.1683	0.0121
PP	1985	NOX	Fator	0.0503	0.0628	1990.7969	0.2089
			Erro	0.0003	0.0001	0.1605	0.0113
PP	1986	NOX	Fator	0.0401	0.0502	1991.6081	0.2073
			Erro	0.0002	0.0000	0.1535	0.0104
PP	1987	NOX	Fator	0.0399	0.0502	1992.3110	0.2026
			Erro	0.0003	0.0000	0.1586	0.0098
L1	1988	NOX	Fator	0.0397	0.0502	1992.9544	0.1974
			Erro	0.0003	0.0000	0.1681	0.0094
L1	1989	NOX	Fator	0.0401	0.0502	1994.0000	0.2090
			Erro	0.0001	0.0000	0.0000	0.0069
L1	1990	NOX	Fator	0.0388	0.0502	1994.0000	0.1817
			Erro	0.0001	0.0000	0.0000	0.0044
L1	1991	NOX	Fator	0.0373	0.0502	1994.0000	0.1612
			Erro	0.0001	0.0000	0.0000	0.0037
L2	1992	NOX	Fator	-0.0153	0.0494	1994.8122	0.0547
			Erro	0.0050	0.0003	1.1926	0.0028
L2	1993	NOX	Fator	0.0004	0.0605	1998.1842	0.0562
			Erro	0.0029	0.0002	0.7317	0.0022
L2	1994	NOX	Fator	0.0221	0.0780	2002.3902	0.0617
			Erro	0.0015	0.0002	0.3864	0.0019
L2	1995	NOX	Fator	0.0106	0.0629	2002.6176	0.0603
			Erro	0.0014	0.0002	0.4137	0.0018
L2	1996	NOX	Fator	0.0081	0.0571	2005.1366	0.0644
			Erro	0.0010	0.0002	0.2938	0.0017
L3	1997	NOX	Fator	0.0067	0.0125	2009.2994	0.0753
			Erro	0.0001	0.0000	0.2664	0.0027
L3	1998	NOX	Fator	0.0036	0.0090	2009.8172	0.0728
			Erro	0.0001	0.0000	0.2677	0.0025
L3	1999	NOX	Fator	0.0036	0.0090	2011.0098	0.0741
			Erro	0.0001	0.0000	0.2502	0.0024

continua

conclusão

L3	2000	NOX	Fator	0.0037	0.0091	2012.3703	0.0761
			Erro	0.0001	0.0000	0.2372	0.0025
L3	2001	NOX	Fator	0.0037	0.0095	2013.9363	0.0796
			Erro	0.0001	0.0000	0.2257	0.0027
L3	2002	NOX	Fator	0.0037	0.0095	2014.9511	0.0794
			Erro	0.0001	0.0000	0.2243	0.0027
L3	2003	NOX	Fator	0.0037	0.0095	2015.9679	0.0790
			Erro	0.0001	0.0000	0.2209	0.0026
L3	2004	NOX	Fator	0.0037	0.0095	2017.0093	0.0788
			Erro	0.0001	0.0000	0.2158	0.0026
L4	2005	NOX	Fator	0.0038	0.0096	2018.2802	0.0822
			Erro	0.0001	0.0000	0.1950	0.0027
L4	2006	NOX	Fator	0.0020	0.0077	2019.0894	0.0787
			Erro	0.0001	0.0000	0.2157	0.0026
L4	2007	NOX	Fator	0.0020	0.0077	2020.1724	0.0792
			Erro	0.0001	0.0000	0.2154	0.0026
L4	2008	NOX	Fator	0.0018	0.0075	2021.1378	0.0790
			Erro	0.0001	0.0000	0.2183	0.0026
L5	2009	NOX	Fator	0.0009	0.0050	2023.2529	0.0886
			Erro	0.0001	0.0000	0.2081	0.0034
L5	2010	NOX	Fator	0.0014	0.0057	2024.4354	0.0907
			Erro	0.0001	0.0000	0.2086	0.0036
L5	2011	NOX	Fator	0.0027	0.0090	2026.1496	0.1002
			Erro	0.0001	0.0001	0.2185	0.0046
L5	2012	NOX	Fator	0.0020	0.0074	2026.9376	0.0972
			Erro	0.0001	0.0000	0.2138	0.0043
L5	2013	NOX	Fator	0.0015	0.0066	2027.8414	0.0959
			Erro	0.0001	0.0000	0.2119	0.0041
L6	2014	NOX	Fator	0.0012	0.0057	2028.5628	0.0925
			Erro	0.0001	0.0000	0.2074	0.0037
L6	2015	NOX	Fator	0.0014	0.0071	2030.0226	0.0988
			Erro	0.0001	0.0000	0.2152	0.0044
L6	2016	NOX	Fator	0.0014	0.0071	2031.0230	0.0988
			Erro	0.0001	0.0000	0.2154	0.0044

TABELA 57 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS – VEÍCULOS FLEX FUEL GASOLINA

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	NOX	Fator	0.0038	0.0127	2017.6255	0.0944
			Erro	0.0001	0.0001	0.2160	0.0040
L3	2004	NOX	Fator	0.0027	0.0086	2017.1006	0.0794
			Erro	0.0001	0.0000	0.2146	0.0026
L4	2005	NOX	Fator	0.0026	0.0077	2016.9734	0.0721
			Erro	0.0001	0.0000	0.2359	0.0022
L4	2006	NOX	Fator	0.0014	0.0061	2016.4749	0.0655
			Erro	0.0001	0.0000	0.2789	0.0018
L4	2007	NOX	Fator	0.0014	0.0062	2017.6130	0.0660
			Erro	0.0001	0.0000	0.2785	0.0019
L4	2008	NOX	Fator	0.0018	0.0068	2019.6398	0.0702
			Erro	0.0001	0.0000	0.2540	0.0022
L5	2009	NOX	Fator	0.0018	0.0070	2023.8227	0.0954
			Erro	0.0001	0.0000	0.2114	0.0040

continua

conclusão

L5	2010	NOX	Fator	0.0014	0.0057	2024.4354	0.0907
			Erro	0.0001	0.0000	0.2086	0.0036
L5	2011	NOX	Fator	0.0014	0.0053	2025.0765	0.0869
			Erro	0.0001	0.0000	0.2095	0.0032
L5	2012	NOX	Fator	0.0013	0.0050	2025.9345	0.0856
			Erro	0.0001	0.0000	0.2100	0.0031
L5	2013	NOX	Fator	0.0012	0.0052	2027.2445	0.0888
			Erro	0.0001	0.0000	0.2077	0.0034
L6	2014	NOX	Fator	0.0015	0.0062	2028.6764	0.0939
			Erro	0.0001	0.0000	0.2092	0.0039
L6	2015	NOX	Fator	0.0012	0.0057	2029.5771	0.0928
			Erro	0.0001	0.0000	0.2079	0.0037
L6	2016	NOX	Fator	0.0012	0.0057	2030.5196	0.0917
			Erro	0.0001	0.0000	0.2091	0.0037

TABELA 58 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS – VEÍCULOS ETANOL

FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
PP	1980	NOX	Fator	0.1557	0.2055	1984.0045	0.1719
			Erro	0.0023	0.0002	0.2969	0.0101
PP	1981	NOX	Fator	0.1573	0.2054	1985.2359	0.1783
			Erro	0.0019	0.0002	0.2468	0.0096
PP	1982	NOX	Fator	0.1564	0.2055	1986.1985	0.1770
			Erro	0.0020	0.0002	0.2517	0.0095
PP	1983	NOX	Fator	0.1562	0.2055	1987.1915	0.1755
			Erro	0.0020	0.0002	0.2602	0.0096
PP	1984	NOX	Fator	0.1758	0.2311	1988.2425	0.1736
			Erro	0.0024	0.0002	0.2744	0.0099
PP	1985	NOX	Fator	0.1764	0.2312	1989.3821	0.1729
			Erro	0.0024	0.0002	0.2858	0.0104
PP	1986	NOX	Fator	0.1084	0.1413	1990.5634	0.1765
			Erro	0.0014	0.0001	0.2727	0.0108
PP	1987	NOX	Fator	0.1087	0.1413	1991.6828	0.1792
			Erro	0.0013	0.0001	0.2629	0.0110
L1	1988	NOX	Fator	0.1091	0.1413	1992.8021	0.1829
			Erro	0.0012	0.0001	0.2437	0.0109
L1	1989	NOX	Fator	0.1102	0.1412	1994.0000	0.1949
			Erro	0.0004	0.0001	0.0000	0.0070
L1	1990	NOX	Fator	0.1056	0.1413	1994.0000	0.1702
			Erro	0.0004	0.0001	0.0000	0.0051
L1	1991	NOX	Fator	0.1001	0.1413	1994.0000	0.1501
			Erro	0.0005	0.0001	0.0000	0.0044
L2	1992	NOX	Fator	0.0346	0.0494	2006.9910	0.1053
			Erro	0.0002	0.0001	0.2281	0.0053
L2	1993	NOX	Fator	0.0396	0.0560	2008.0624	0.1060
			Erro	0.0003	0.0001	0.2314	0.0055
L2	1994	NOX	Fator	0.0417	0.0565	2009.1517	0.1045
			Erro	0.0002	0.0001	0.2189	0.0050
L2	1995	NOX	Fator	0.0417	0.0564	2010.2353	0.1049
			Erro	0.0002	0.0001	0.2179	0.0051
L2	1996	NOX	Fator	0.0189	0.0281	2010.5215	0.0953
			Erro	0.0001	0.0001	0.2109	0.0040

continua

conclusão

L3	1997	NOX	Fator	0.0117	0.0174	2009.2530	0.0758
			Erro	0.0001	0.0000	0.2490	0.0026
L3	1998	NOX	Fator	0.0139	0.0220	2012.3014	0.0923
			Erro	0.0001	0.0001	0.2124	0.0037
L3	1999	NOX	Fator	0.0128	0.0213	2013.3874	0.0934
			Erro	0.0001	0.0001	0.2163	0.0039
L3	2000	NOX	Fator	0.0138	0.0224	2014.4387	0.0936
			Erro	0.0001	0.0001	0.2201	0.0040
L3	2001	NOX	Fator	0.0167	0.0279	2015.9363	0.0995
			Erro	0.0002	0.0001	0.2280	0.0048
L3	2002	NOX	Fator	0.0168	0.0274	2016.9012	0.0981
			Erro	0.0002	0.0001	0.2261	0.0046
L3	2003	NOX	Fator	0.0187	0.0303	2018.0608	0.0996
			Erro	0.0002	0.0001	0.2257	0.0047
L3	2004	NOX	Fator	0.0158	0.0255	2018.8876	0.0964
			Erro	0.0001	0.0001	0.2150	0.0042
L4	2005	NOX	Fator	0.0139	0.0342	2016.0799	0.0690
			Erro	0.0004	0.0001	0.2503	0.0020

TABELA 59 – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DOS FATORES DE EMISSÕES DE ALDEÍDOS – VEÍCULOS FLEX ETANOL

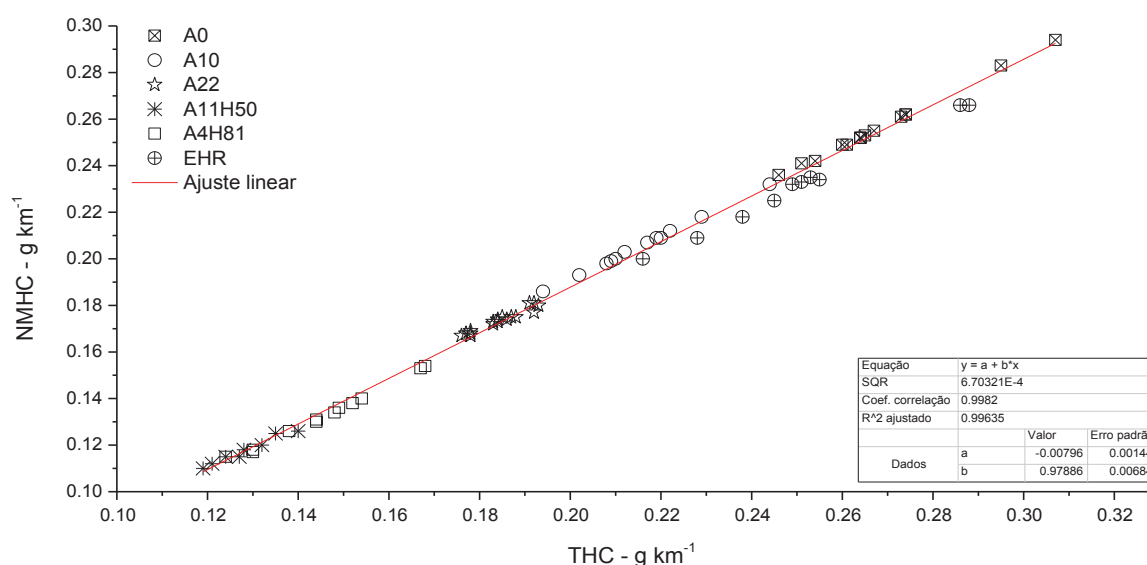
FASE	ANO	COMPOSTO	Dados	A1	A2	LOGx0	p
L3	2003	NOX	Fator	0.0168	0.0357	2011.4903	0.0667
			Erro	0.0005	0.0001	0.3679	0.0021
L3	2004	NOX	Fator	0.0119	0.0330	2015.3083	0.0692
			Erro	0.0004	0.0001	0.2614	0.0021
L4	2005	NOX	Fator	0.0130	0.0301	2017.0377	0.0729
			Erro	0.0004	0.0001	0.3073	0.0030
L4	2006	NOX	Fator	0.0209	0.0434	2020.0254	0.0859
			Erro	0.0004	0.0002	0.2299	0.0035
L4	2007	NOX	Fator	0.0209	0.0437	2021.0862	0.0864
			Erro	0.0004	0.0002	0.2288	0.0035
L4	2008	NOX	Fator	0.0129	0.0311	2020.7988	0.0759
			Erro	0.0004	0.0001	0.2809	0.0031
L5	2009	NOX	Fator	0.0105	0.0315	2022.3116	0.0802
			Erro	0.0003	0.0001	0.2191	0.0028
L5	2010	NOX	Fator	0.0091	0.0180	2025.1675	0.1002
			Erro	0.0001	0.0001	0.2188	0.0047
L5	2011	NOX	Fator	0.0083	0.0162	2026.0064	0.0980
			Erro	0.0001	0.0001	0.2152	0.0044
L5	2012	NOX	Fator	0.0081	0.0151	2026.8236	0.0956
			Erro	0.0001	0.0001	0.2119	0.0041
L5	2013	NOX	Fator	0.0081	0.0158	2027.9859	0.0979
			Erro	0.0001	0.0001	0.2146	0.0043
L6	2014	NOX	Fator	0.0056	0.0221	2024.7245	0.0665
			Erro	0.0003	0.0001	0.2756	0.0019
L6	2015	NOX	Fator	0.0054	0.0216	2025.3594	0.0652
			Erro	0.0003	0.0001	0.2798	0.0018
L6	2016	NOX	Fator	0.0051	0.0217	2025.9713	0.0635
			Erro	0.0004	0.0001	0.3200	0.0019

## APÊNDICE 9 – REGRESSÕES PARA CORRELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC

### 1) RESULTADOS EM MOTOCICLOS

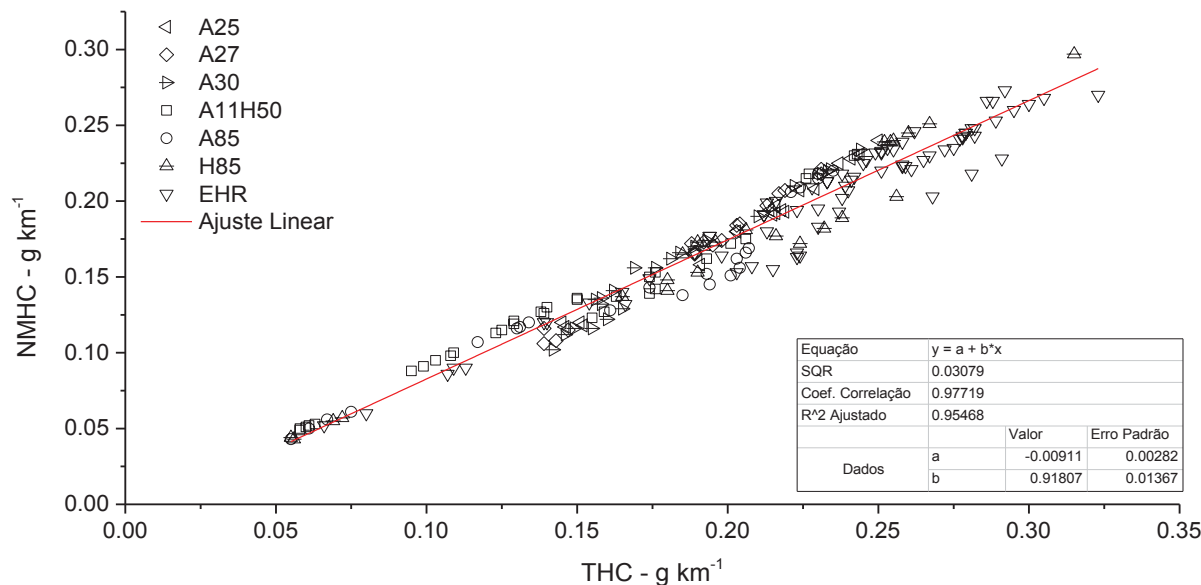
Uma das particularidades da frota brasileira foi a introdução pioneira de motocicletas *flex fuel*, tecnologia que permite utilizar como combustível gasolina, etanol e suas misturas, sendo escassas as informações sobre emissões nesses veículos (DAEMME; PENTEADO; ZOTIN, 2012; DAEMME et al., 2016c). Para verificar a influência do teor de etanol no combustível e a relação entre as emissões de NMHC/THC efetuaram-se ensaios em um motociclo *flex fuel*, fase M3, com motor de 150cc. Os combustíveis utilizados nos experimentos continham: 0% de etanol (A0); 10% de etanol (A10); 22% de etanol (A22); 61% de etanol (A11H50); 85% de etanol (A4H81) e 100% de etanol (EHR). Como se nota na FIGURA 117, mesmo com a variação do teor de etanol no combustível, a relação entre as emissões de THC e NMHC manteve-se linear. Observa-se que a parcela de etanol não queimado presente nos gases de escape e detectada pelo analisador de hidrocarbonetos não foi descontada.

FIGURA 117 – RELAÇÃO ENTRE NMHC E THC COM DIFERENTES TEORES DE ETANOL EM MOTOCICLO FLEX FUEL



O planejamento experimental contemplou ensaios em motocicletas *flex fuel* com uso de diferentes teores de etanol objetivando verificar as emissões com essas variações. Com o objetivo de verificar a manutenção da relação entre as emissões de THC e NMHC com o uso de diferentes teores de etanol, utilizaram-se 13 motocicletas das fases M3 e M4, empregando-se combustíveis com teores de etanol entre 25% e 100%, totalizando 215 ensaios. Na FIGURA 118 observa-se a regressão dos dados, sendo que, mesmo com diferentes teores de etanol, obteve-se um elevado coeficiente de correlação ajustado (0,95). A correlação demonstra potencial para estimar emissões médias de NMHC com dados do total de hidrocarbonetos emitidos com uso de teores de etanol acima de 25% em motocicletas gasolina e/ou *flex fuel*.

FIGURA 118 – RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC COM TEORES DE ETANOL ENTRE 25% E 100%



Na FIGURA 119 e TABELA 60 são apresentados os gráficos e dados das regressões individuais para cada combustível. Observa-se que o nível de correlação se mantém elevado para as regressões individuais dos combustíveis utilizados nos experimentos.

FIGURA 119 – RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC COM TEORES DE ETANOL ENTRE 25 E 100%

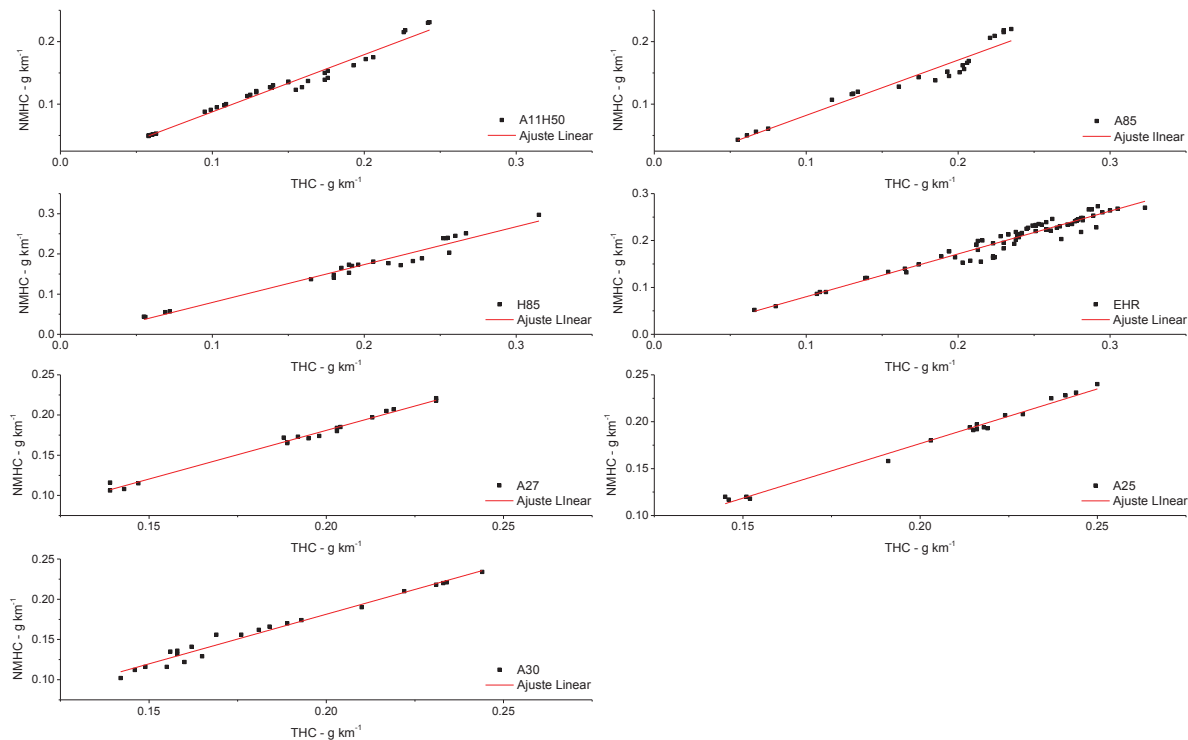




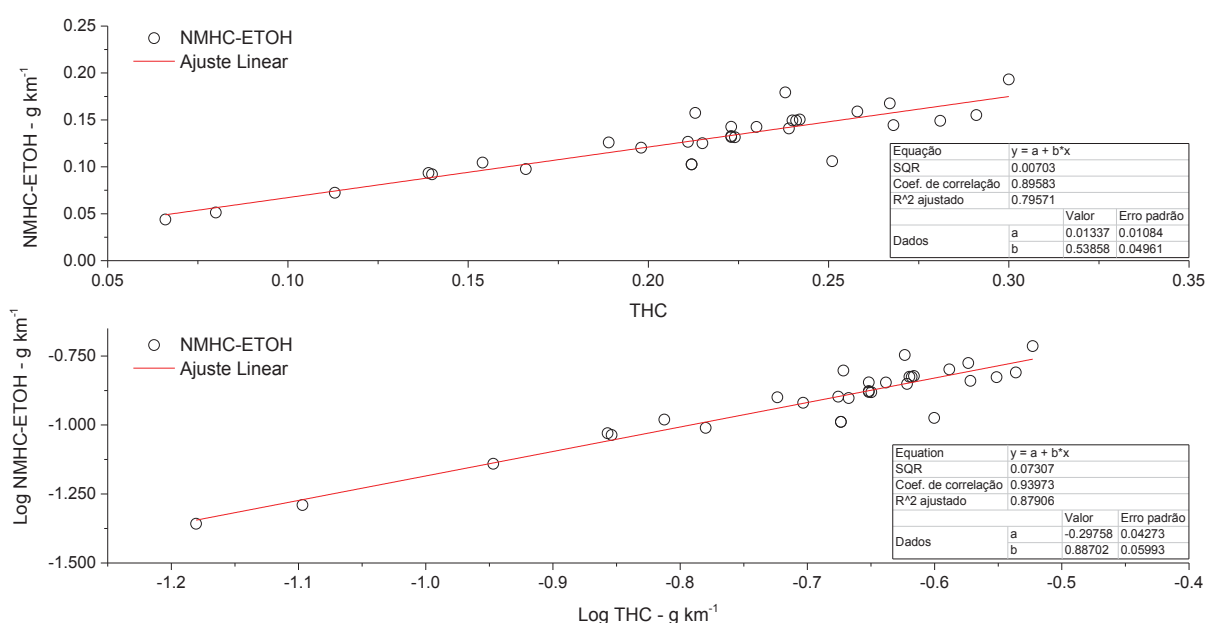
TABELA 60 – DADOS DAS REGRESSÕES ENTRE EMISSÕES DE THC E NMHC COM DIFERENTES TEORES DE ETANOL

Combustível	a	Erro Padrão	b	Erro Padrão	R <sup>2</sup> Ajustado	Número pontos
A11H50	-0,00375	0,0043	0,91472	0,0280	0,971	33
A85	-0,00618	0,0089	0,88330	0,0502	0,934	23
H85	-0,01498	0,0084	0,94228	0,0406	0,959	24
EHR	-0,01111	0,0065	0,91285	0,0274	0,937	76
A27	-0,06121	0,0059	1,21067	0,0305	0,989	18
A25	-0,05629	0,0061	1,16511	0,0292	0,989	19
A30	-0,06514	0,0077	1,23254	0,0417	0,977	22

Para estimar as emissões de NMHC nos veículos *flex fuel* com o uso de etanol desta pesquisa, utilizou-se a equação constante na TABELA 60 com uso de etanol hidratado de referência (EHR).

Para estimar as emissões de NMHC, descontadas as emissões ANQ, foram realizados ensaios em 7 motocicletas *flex fuel* com uso de etanol hidratado combustível e análises das emissões conforme normas ABNT 6601 e ABNT 15.598. Os valores detectados de ANQ foram descontados das emissões de NMHC, propiciando conhecer uma estimativa dessas emissões sem a participação do álcool não queimado presente nos gases de escapamento. Esse procedimento tem por objetivo separar as emissões de compostos mais reativos na atmosfera (gases do tipo não metano) das emissões de álcool não queimado, considerado menos reativo. A FIGURA 120 apresenta a correlação entre as emissões de hidrocarbonetos do tipo não metano menos a emissão de álcool não queimado (NMHC-ETOH) com as emissões de THC. O coeficiente de correlação ajustado de 0,88 demonstra possibilidade de estimar essas emissões a partir dos dados das emissões de THC com uso etanol hidratado combustível.

FIGURA 120 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC/NMHC E THC/NMHC-ANQ



Para demonstrar a aplicação da relação apresentada (THC/NMHC), calcularam-se as emissões de NMHC e CH<sub>4</sub> a partir das emissões de THC em ensaios de motocicletas de diferentes tecnologias empregando gasolina A22, sendo que esses resultados não fizeram parte dos dados utilizados na regressão. Os valores medidos e os estimados estão apresentados na TABELA 61, sendo ensaios em oito motocicletas diferentes, pertencentes às fases M4, M3, M2 e M1. Os valores estimados para NMHC comparados aos medidos demonstram uma variação reduzida, na ordem de 1%. Para as estimativas de CH<sub>4</sub> a variação chega a 23%, porém, na média geral, o desvio para o metano ficou em 3,8%, demonstrando viabilidade de uso da relação para estimativa de emissões em frotas.

TABELA 61 – COMPARATIVO DE VALORES MEDIDOS E ESTIMADOS DE NMHC E CH<sub>4</sub> UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE REGRESSÃO PROPOSTA

Fase Promot/ ciclo/ motor	THC g km <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> g km <sup>-1</sup>	NMHC g km <sup>-1</sup>	NMHC estimado g km <sup>-1</sup>	Diferença %	CH <sub>4</sub> estimado g km <sup>-1</sup>	Diferença %
M3/ Euro/ 125cc	0,258	0,016	0,242	0,241	-0,4%	0,017	5,9%
M3/ Euro/ 150cc	0,186	0,013	0,173	0,173	0,0%	0,013	0,0%
M1/ Euro/ 125cc	0,854	0,041	0,813	0,806	-0,9%	0,048	14,6%
M2/ Euro/ 100cc	0,896	0,041	0,855	0,846	-1,1%	0,050	18,0%
M3/ Euro/ 150cc	0,183	0,013	0,170	0,170	0,0%	0,013	0,0%
M1/ Euro/ 150cc	1,613	0,106	1,507	1,526	1,2%	0,087	-21,8%
M4/ Euro/ 160cc	0,118	0,007	0,111	0,109	-1,8%	0,009	22,2%
M4/ Euro/ 250cc	0,174	0,013	0,161	0,162	0,6%	0,012	-8,3%
Média geral		0,0313	0,5040	0,5041	-0,29%	0,0311	3,8%

## 2) RESULTADOS EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIRO

Na FIGURA 121 apresentam-se os dados para os veículos das fases L5 e L6 com uso de etanol. Observa-se uma mudança no coeficiente angular, quando comparado com as fases anteriores, demonstrando uma maior participação das emissões do metano nas emissões dos hidrocarbonetos totais.

O mesmo processo foi adotado para os veículos com uso de gasolina, sendo as relações apresentadas na FIGURA 122 para os veículos das fases PP, L1, L2, L3 e L4 e na FIGURA 123 para os veículos das fases L5 e L6.

FIGURA 121 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES L5 E L6, USANDO ETANOL

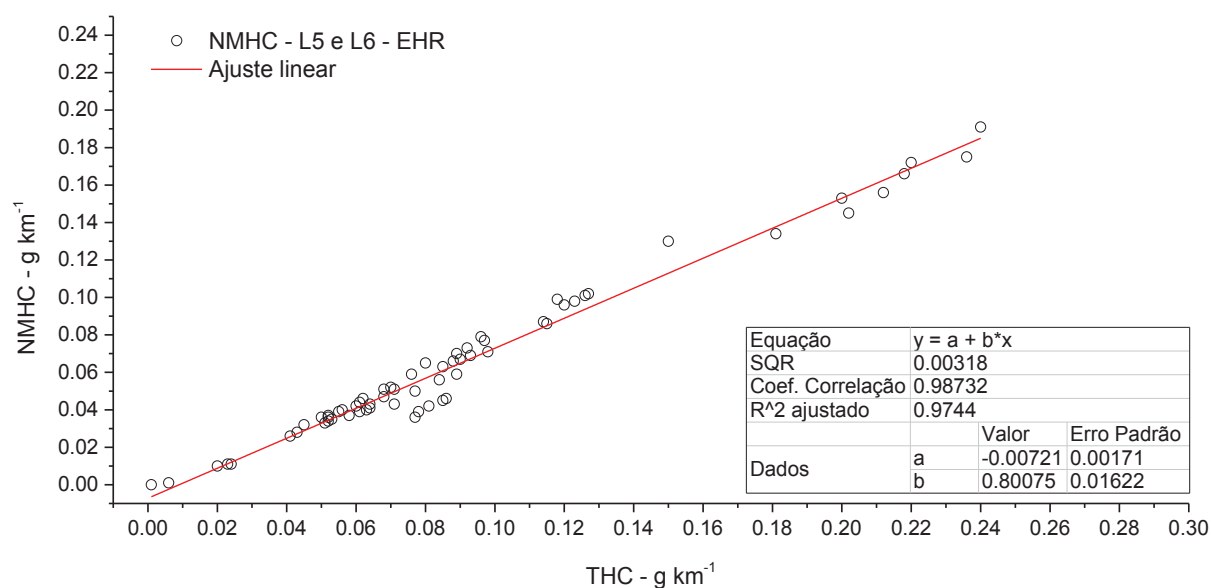
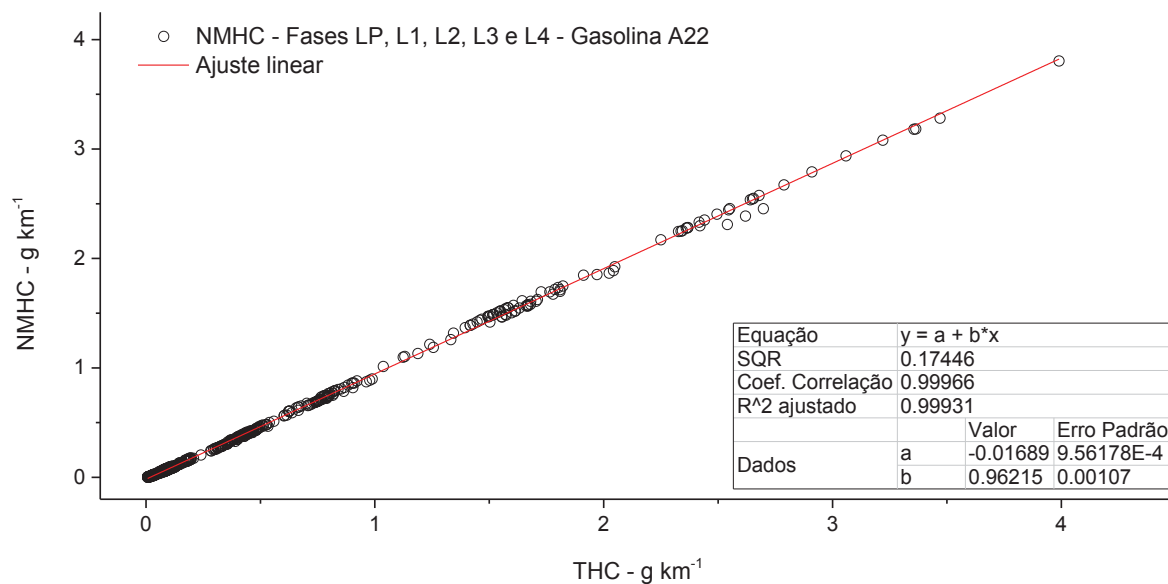
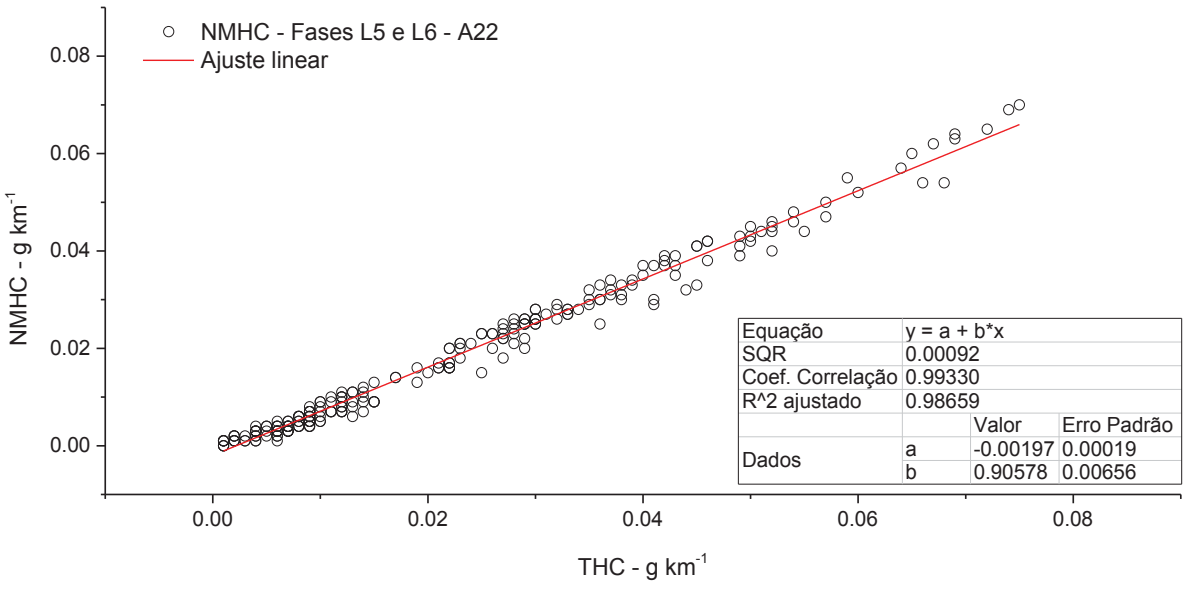


FIGURA 122 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES PP, L1, L2, L3 E L4, USANDO GASOLINA A22



Nas correlações foram usados ensaios das amostras do planejamento experimentais, nos ciclos FTP e HWFET.

FIGURA 123 – RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE THC E NMHC PARA VEÍCULOS DAS FASES L5 E L6, USANDO GASOLINA A22



## APÊNDICE 10 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE EMISSÃO DE N<sub>2</sub>O EM VEÍCULOS LEVES DE PASSAGEIROS DA FASE L3

A emissão de N<sub>2</sub>O ocorre com maior intensidade em veículos com catalisadores de três vias, devido à formação do composto durante o processo de catálise (DASCH, 1992; WALLINGTON; WIESEN, 2014). Em veículos com maior intensidade de uso, a tendência é o aumento das emissões de N<sub>2</sub>O devido à queda na eficiência de conversão do composto pelo catalisador (ODAKA; KOIKE; SUZUKI, 2000; LIPMAN; DELUCCHI, 2002). As emissões com maior intensidade de N<sub>2</sub>O ocorrem nos instantes iniciais de funcionamento do veículo, em sua fase fria (DAEMME et al., 2014d).

Nos resultados dos fatores de emissão apresentados observa-se uma maior emissão para os veículos leves de passageiros da fase L3. Essa foi a fase que efetivamente necessitou da implantação dos sistemas de injeção eletrônica nos veículos e uso de catalisador de três vias (VICENTINI, 2011; MMA, 2013), porém os limites de emissões para o NO<sub>x</sub> ainda eram elevados quando comparados com as fases posteriores. O limite da fase L3 foi estabelecido em 0,60 g km<sup>-1</sup> para as emissões de NO<sub>x</sub>, sendo os limites das fases posteriores de 0,25 g km<sup>-1</sup> e 0,12 g km<sup>-1</sup> para as fases L4 e L5, respectivamente. Segundo Branco, Branco e Blumrich (2016), as emissões antes do catalisador nos veículos dessa fase estavam em aproximadamente 0,60 g km<sup>-1</sup>, no limite da legislação. Enquanto isso, as emissões de THC e CO foram as que apresentaram maior redução quando comparadas à fase anterior. Os veículos dessa fase foram os que apresentaram uma elevação mais acentuada nos fatores de emissão para o NO<sub>x</sub>, quando comparados os dados desta pesquisa com o IEV. Isso é demonstrado posteriormente nos comparativos entre as emissões provenientes dos fatores de emissão propostos e do IEV.

Com base nessas informações pode-se deduzir que as maiores emissões de N<sub>2</sub>O nos veículos dessa fase devem-se a catalisadores projetados para uma menor taxa de redução para o NO<sub>x</sub>, maior oxidação para o CO e THC e seu envelhecimento. Efetuando-se cálculo médio da eficiência de conversão do catalisador para a fase L3, usando os dados de emissões antes e após o catalisador de Branco, Branco e Blumrich (2016), obtém-se as seguintes médias de eficiências de conversão:

- CO: 90% de conversão;
- THC: 78% de conversão;
- NO<sub>x</sub>: 72% de conversão.

Os dados apresentados nos ensaios do motociclo com uso de catalisadores com diferentes acúmulos de quilometragem, FIGURA 54, corroboram as informações citadas. Os valores da concentração de N<sub>2</sub>O (ppmv) do experimento realizado durante os ensaios no motociclo com diferentes configurações do sistema de pós-tratamento são mostrados na

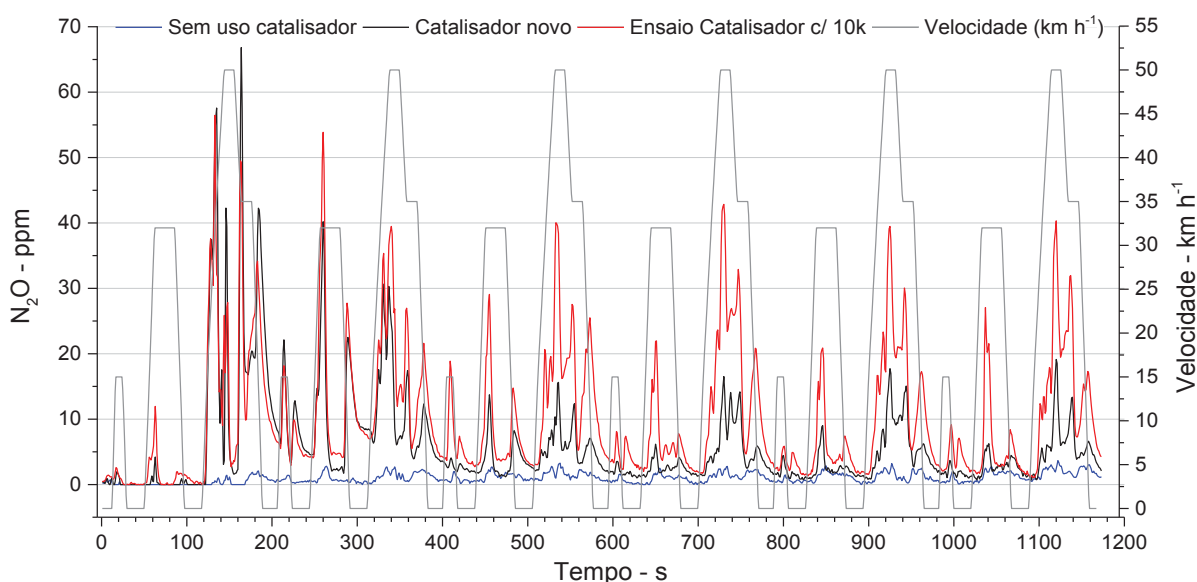
FIGURA 124. Observa-se a concentração das emissões de N<sub>2</sub>O (ppmv) durante o ciclo de ensaio em três condições distintas:

- sem uso de catalisador: observa-se que as emissões são reduzidas (abaixo de 5 ppmv);
- com catalisador novo: ocorrem picos mais altos de emissão no início do ciclo, fase fria, e depois uma redução, com picos abaixo de 20 ppmv –

situação em que ocorre a redução de parte do  $N_2O$  formado pelo catalisador.

- usando catalisador com 10.000 km acumulados: observa-se que as emissões apresentam uma menor redução quando comparada à situação anterior, em que, mesmo após o aquecimento do conjunto (motor/catalisador), a emissão se mantém com picos próximos a 40 ppmv, demonstrando uma redução na eficiência de conversão do composto devido ao desgaste do catalisador. Todas as condições são com uso de gasolina A22-S50. O perfil de velocidade apresentado se refere ao padrão do ciclo europeu de ensaios.

FIGURA 124 – EMISSÃO DE  $N_2O$  EM MOTOCICLO COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA DE PÓS-TRATAMENTO



Na FIGURA 125 são apresentados valores da concentração de  $N_2O$  em veículos da fase L3, para as amostras L3-G-02 e L3HE-G-07, referindo-se os resultados ao uso de gasolina A22-S50. Observa-se que a emissão se mantém durante todo o ciclo de emissões, o comportamento sendo similar à situação do catalisador do motociclo com maior acúmulo de quilometragem, conforme FIGURA 124.

Na FIGURA 126 são apresentadas as informações de concentração de  $N_2O$  para uma amostra da fase L6. Observa-se uma emissão mais preponderante nos instantes iniciais do ciclo, durante a partida a frio da primeira fase e após 1400 segundos, instante em que se inicia a terceira fase. Os picos de emissão possuem concentrações superiores às observadas anteriormente, porém são em pontos isolados do ciclo de ensaio, indicando uma maior redução do composto pelo catalisador nas demais condições.

FIGURA 125 – EMISSÃO DE  $\text{N}_2\text{O}$  - VEÍCULO LEVE DE PASSAGEIROS DA FASE L3 COM GASOLINA A22-S50

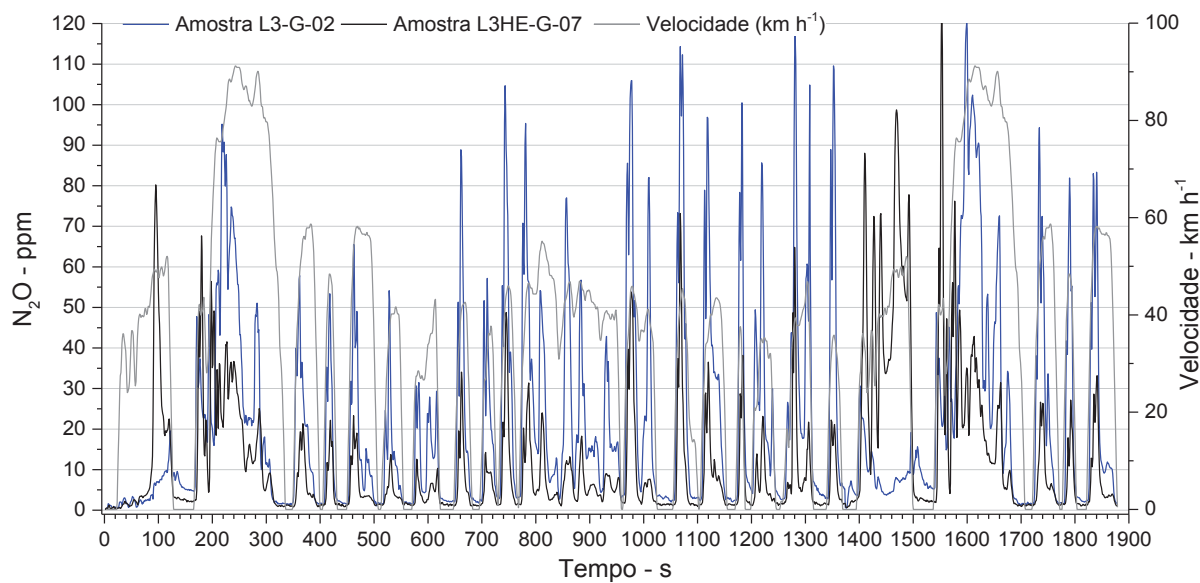
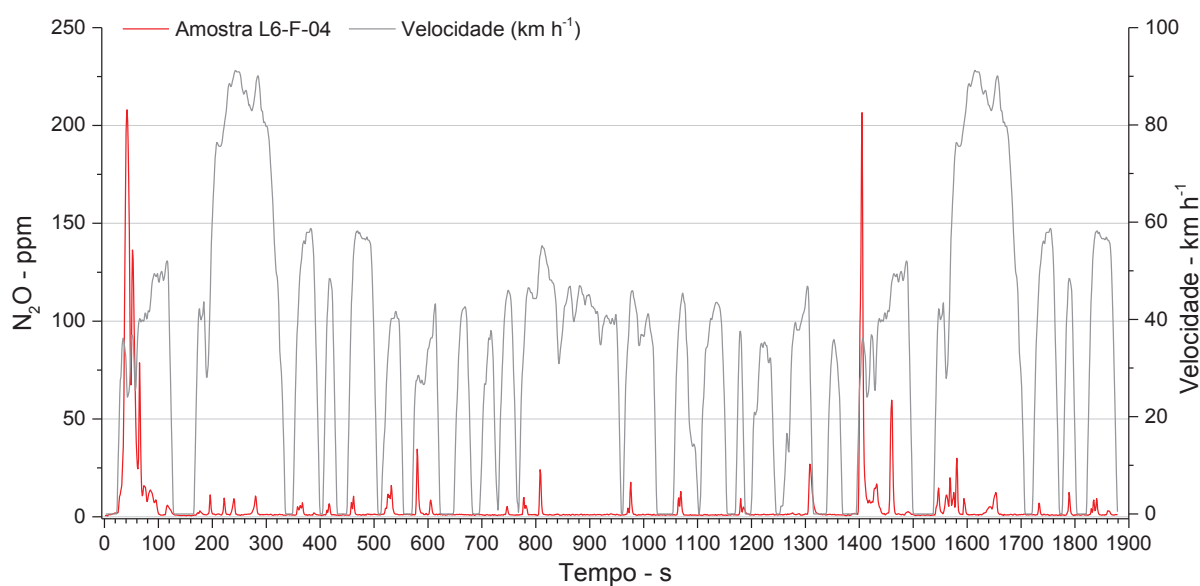


FIGURA 126 – EMISSÃO DE  $\text{N}_2\text{O}$  - VEÍCULO LEVE DE PASSAGEIROS DA FASE L6 COM GASOLINA A22-S50

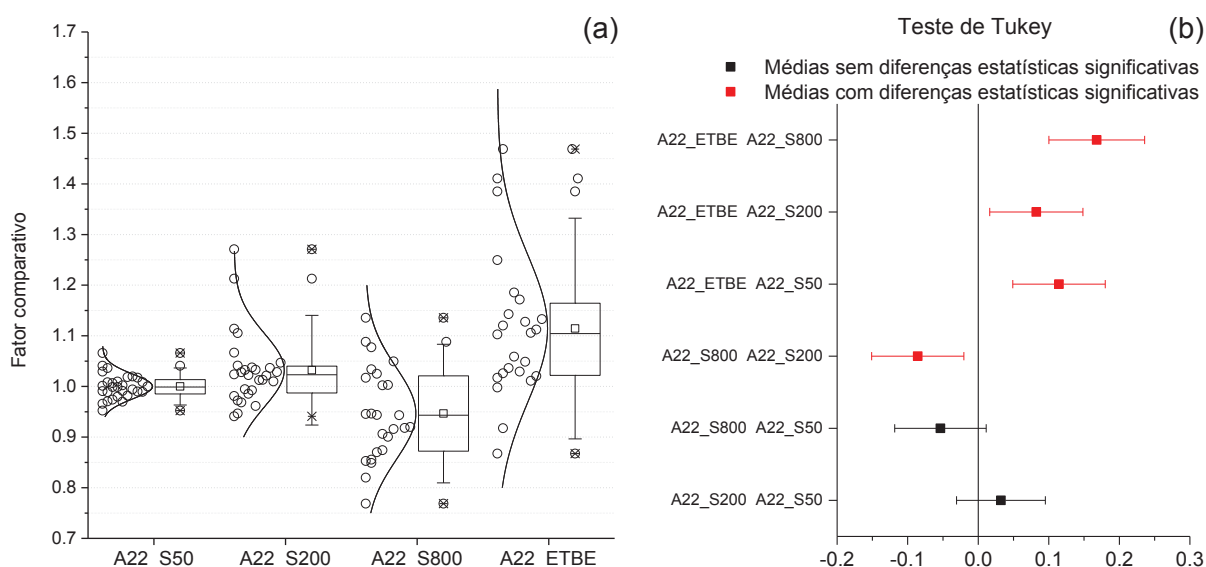


As informações apresentadas demonstram coerência dos resultados obtidos nas emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  para as diferentes fases de emissões do PROCONVE.

## APÊNDICE 11 – COMPARATIVOS ENTRE COMBUSTÍVEIS

A continuidade dos comparativos entre combustíveis são apresentados, sendo que a FIGURA 127 demonstra o fator comparativo das emissões de THC para motocicletas no grupo G1, os valores das emissões seguem o mesmo perfil das emissões de CO, porém com menor índice para a gasolina S800 (5% abaixo da gasolina S50). A maior emissão acontece com uso de A22-ETBE, combustível considerado estatisticamente diferente dos demais.

FIGURA 127 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE THC COM USO DE DIFERENTES GASOLINAS (A) E TESTE DE TUKEY (B)



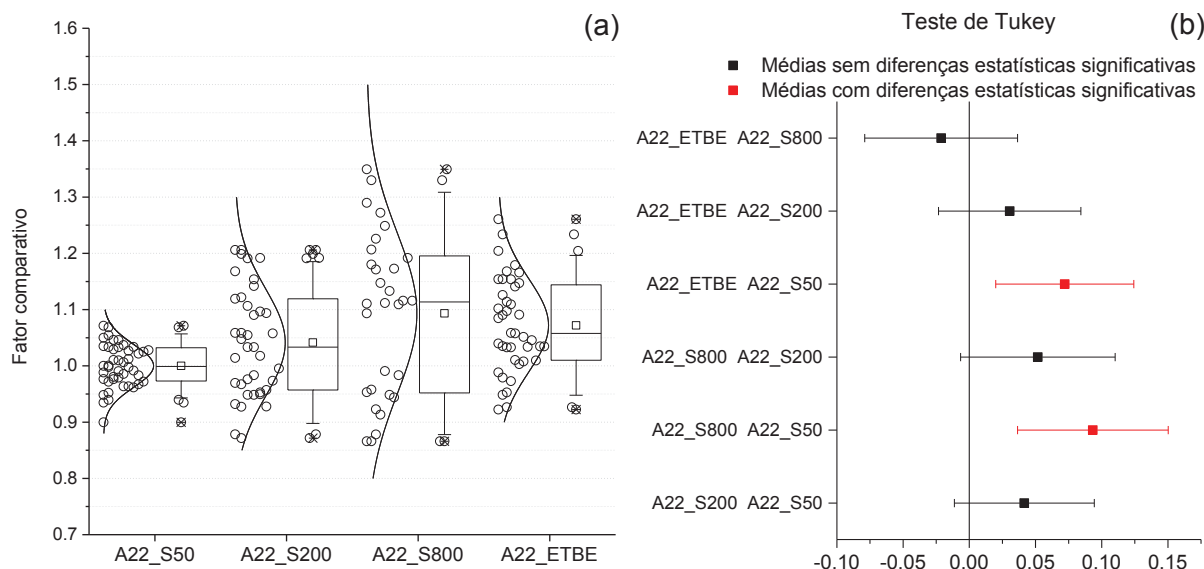
FONTE: O autor (2017).

Nos motocicletas M3 e M4 (G2) observa-se para o THC a mesma tendência do CO, ou seja, uma maior emissão para o combustível com maior teor de enxofre (S800), conforme apresentado na FIGURA 128. A gasolina S50, com menor índice de emissões, não apresenta diferenças estatísticas quando comparada com a gasolina S200.

Quanto às emissões de NOx nos veículos do grupo G1, o menor índice ocorre com gasolina A22-ETBE, cerca de 10% abaixo do valor de referência (A22-S50). Observa-se, ainda, na FIGURA 129 (b) que não existem diferenças significativas entre as gasolinas S50, S200 e S800. No grupo G1, para a gasolina A22-ETBE, observou-se, de forma geral, um aumento das emissões de CO e THC e uma redução nas emissões de NOx, demonstrando um possível desequilíbrio na relação ar/combustível, tornando-se mais rica.

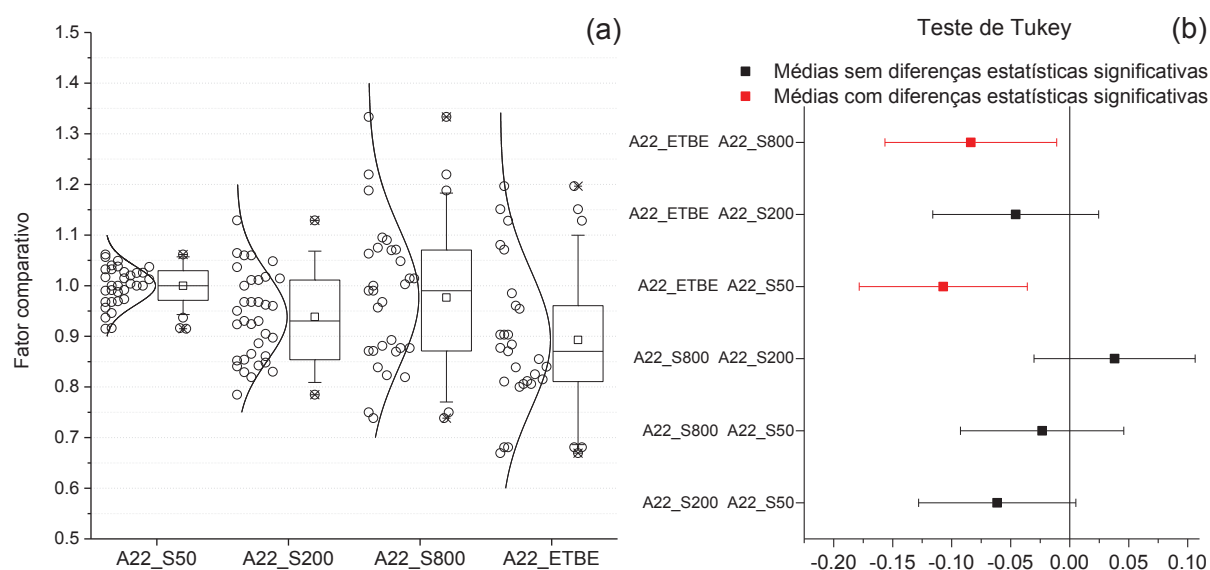


FIGURA 128 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE THC COM DIFERENTES GASOLINAS - MOTOCICLOS M3 E M4 (A) E TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

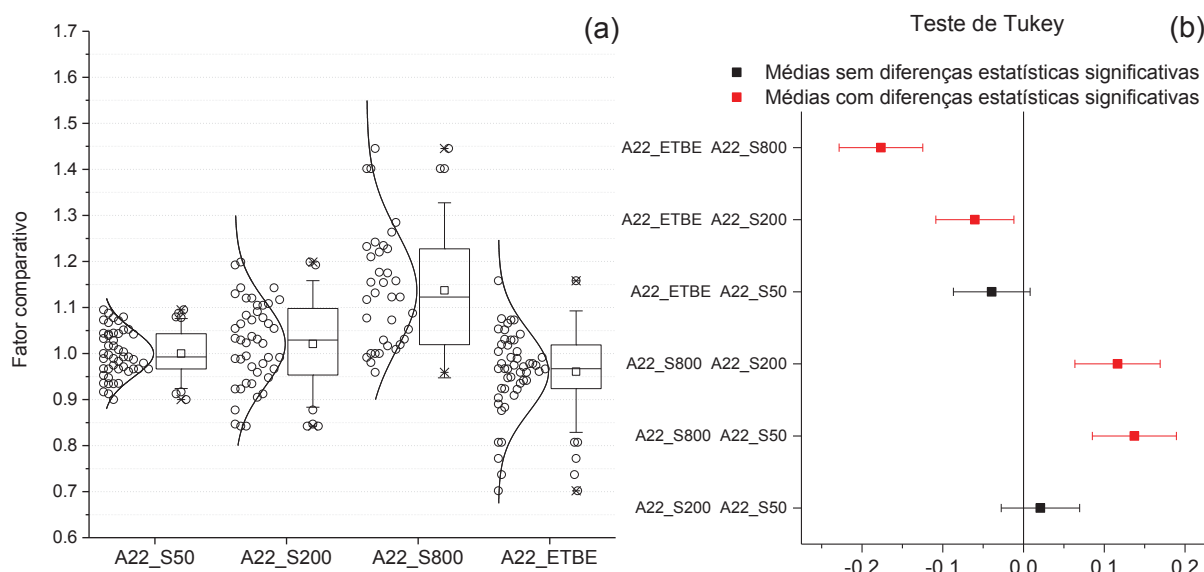
FIGURA 129 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS - MOTOCICLOS PP, M1 E M2 (A) E TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

Nas emissões de NO<sub>x</sub> das amostras do grupo G2, FIGURA 130, o teor de enxofre ocasiona o mesmo comportamento observado anteriormente para o CO e THC, com maior índice de emissões para gasolina S800 (↑13%). Observa-se, ainda, que esse combustível apresenta diferenças estatísticas significativas quando comparado aos demais. O poder estatístico do teste foi de 1,00.

FIGURA 130 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS - MOTOCICLOS M3 E M4 (A) E TESTE DE TUKEY (B)

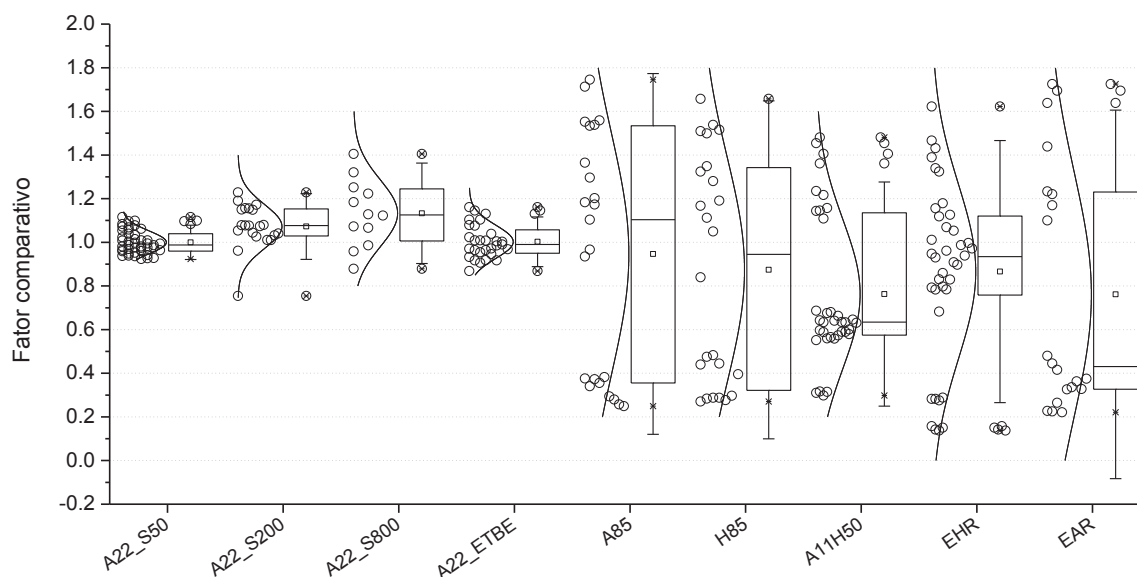


FONTE: O autor (2017).

Os motocicletos com tecnologia flex fuel das fases M3 e M4 foram ensaiados com um grupo de nove diferentes combustíveis, conforme plano de ensaios. O comparativo entre os combustíveis seguiu o método empregado nos resultados demonstrados para uso de gasolina. Na FIGURA 131 podem-se observar os resultados do fator comparativo com uso dos nove diferentes combustíveis para o CO. Verifica-se um comportamento disperso entre as amostras, tendo como referência as gasolinas A22 com os demais combustíveis com aumento de teor de etanol. Este fato pode estar relacionado a problemas no processo de aprendizado dos veículos para se auto adaptarem com o aumento dos teores de etanol na gasolina. Devido à alta variabilidade entre os dados, foram considerados com diferença estatística significativas apenas os tratamentos entre A22-S200 e A11-H50 e entre A22-S200 e A11-H50.

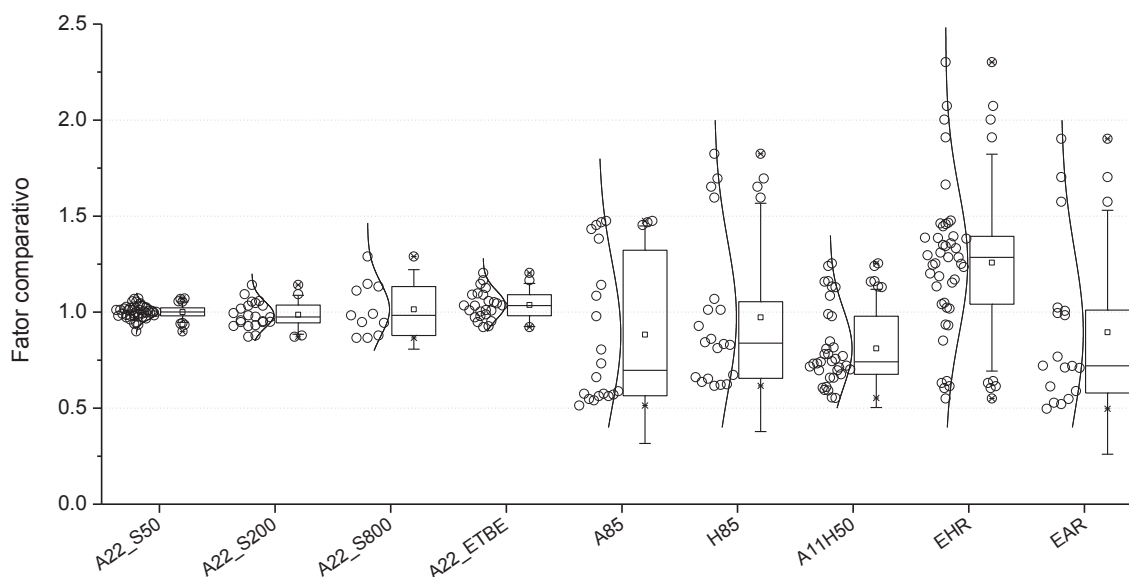
Na FIGURA 132 apresentam-se os resultados para o total de hidrocarbonetos. Com aplicação da análise de variância e teste de Tukey observou-se que os resultados com EHR apresentaram diferenças significativas, comparados aos demais combustíveis. Conforme comentários anteriores, nas emissões de THC contabilizam-se as emissões de ANQ que são expressivas, principalmente nos instantes iniciais de operação dos veículos (DAEMME et al., 2016c). Observou-se, ainda, diferenças significativas entre os tratamentos com A11-H50 e as gasolinas A22 e com H85.

FIGURA 131 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS E TEORES DE ETANOL - MOTOCICLOS *FLEX FUEL*



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 132 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE THC COM DIFERENTES GASOLINAS E TEORES DE ETANOL - MOTOCICLOS *FLEX FUEL*

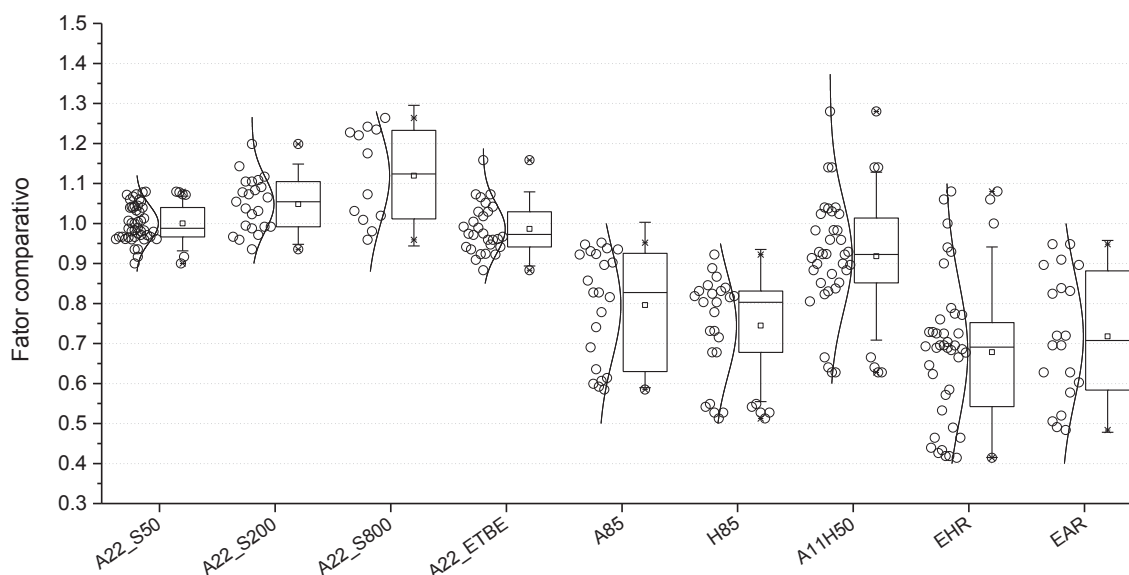


FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 133 apresentam-se os resultados para o NO<sub>x</sub>, observando-se uma menor dispersão entre os resultados, se comparada com as análises anteriores. Como consequência, um maior número de diferenças entre os tratamentos é evidenciado pela aplicação da análise de variância e teste de Tukey. Destaca-se o menor índice de emissão com EHR, considerado sem diferenças com

A11-H50 e EAR. Entre as gasolinas A22, apenas uma diferença foi constatada entre ETBE e S800.

FIGURA 133 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS E TEORES DE ETANOL - MOTOCICLOS *FLEX FUEL*



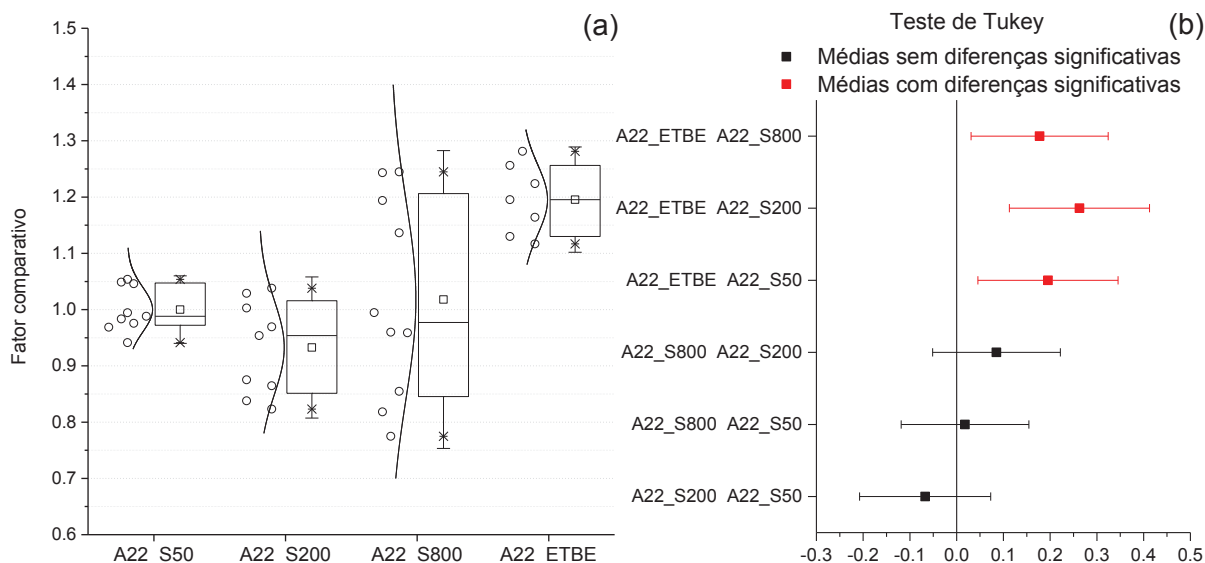
FONTE: O autor (2017).

As mesmas premissas adotadas para os motocicletos foram aplicadas aos veículos leves de passageiros. Sendo criados grupos separando-se os veículos das fases PP e L1, grupo denominado V1, das fases L2, L3, L4, L5 e L6, grupo V2, devido diferenças tecnológicas. Sendo ainda avaliados de forma independente os veículos dedicados à etanol.

Na FIGURA 134 são apresentadas as comparações para os veículos leves de passageiros das fases PP e L1 (V1). Observa-se uma maior emissão de CO para gasolina A22-ETBE, que foi considerada estatisticamente diferente das demais.

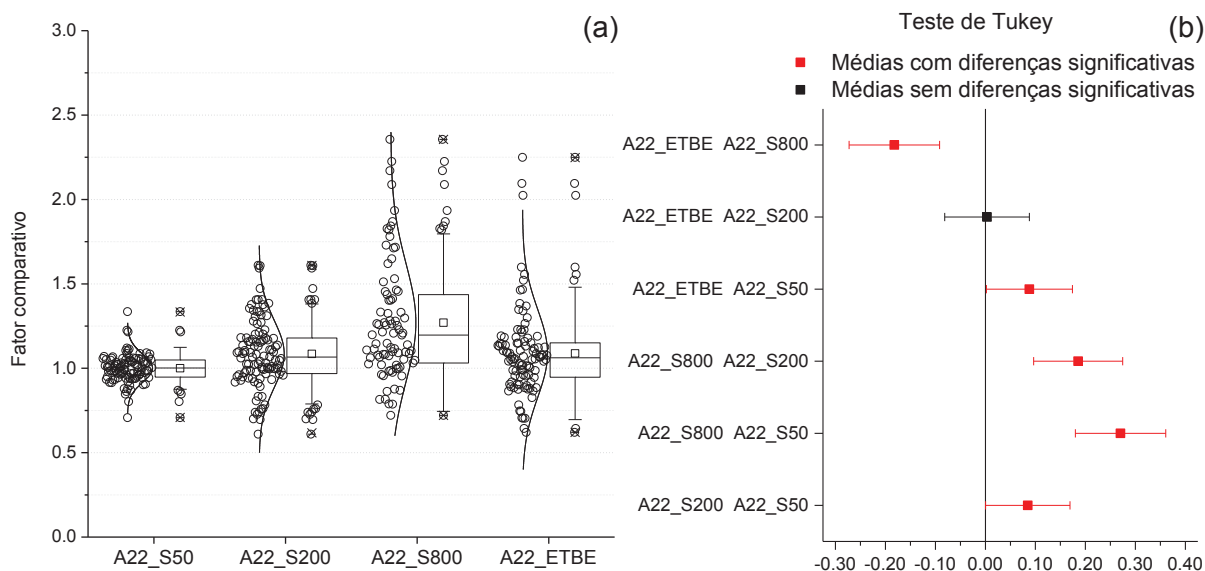
Para as demais fases dos veículos leves de passageiros (V2) as emissões de CO são apresentadas na figura FIGURA 135. Observa-se uma maior emissão do composto para a gasolina de maior teor de enxofre (S800), seguindo a mesma tendência observada nos motocicletos mais modernos. Os únicos combustíveis considerados sem diferenças estatísticas significativas entre si foram as gasolinas A22-S200 e A22-ETBE.

FIGURA 134 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 135 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)

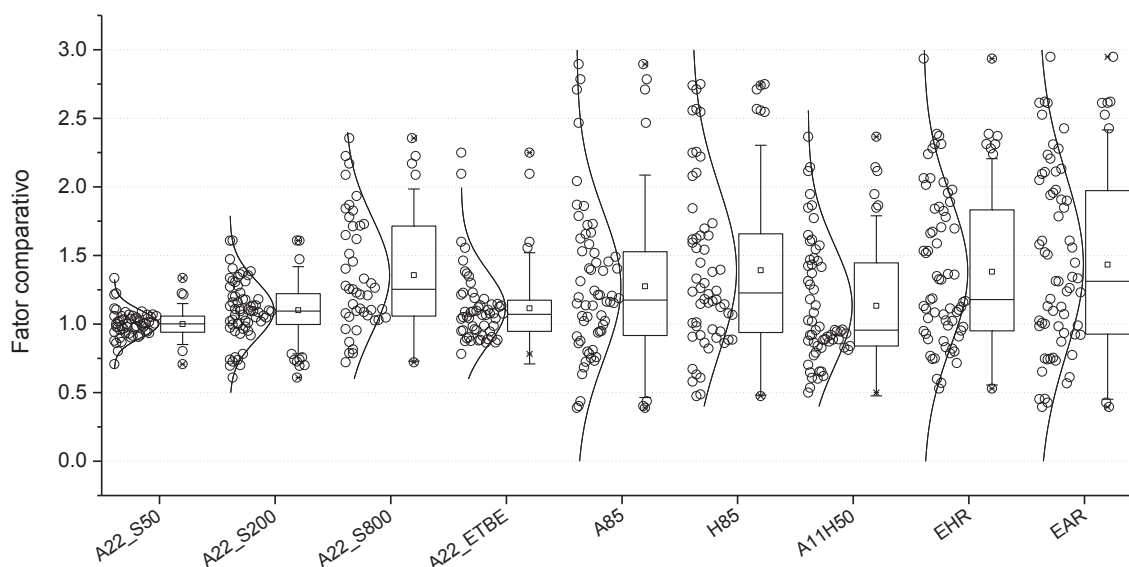


FONTE: O autor (2017).

Para os veículos leves de passageiros com sistema de injeção de combustível flex fuel observa-se o mesmo comportamento dos motocicletas, ou seja, uma alta dispersão dos resultados com aumento do teor de etanol no combustível. A FIGURA 136 retrata as emissões de CO nos veículos leves, onde todos combustíveis testados apresentaram um fator médio de emissão superior ao da

referência (A22-S50). A gasolina A22-S50 apresentou diferenças estatísticas significativas quando comparada aos combustíveis: S800, A85, H85, EHR e EAR.

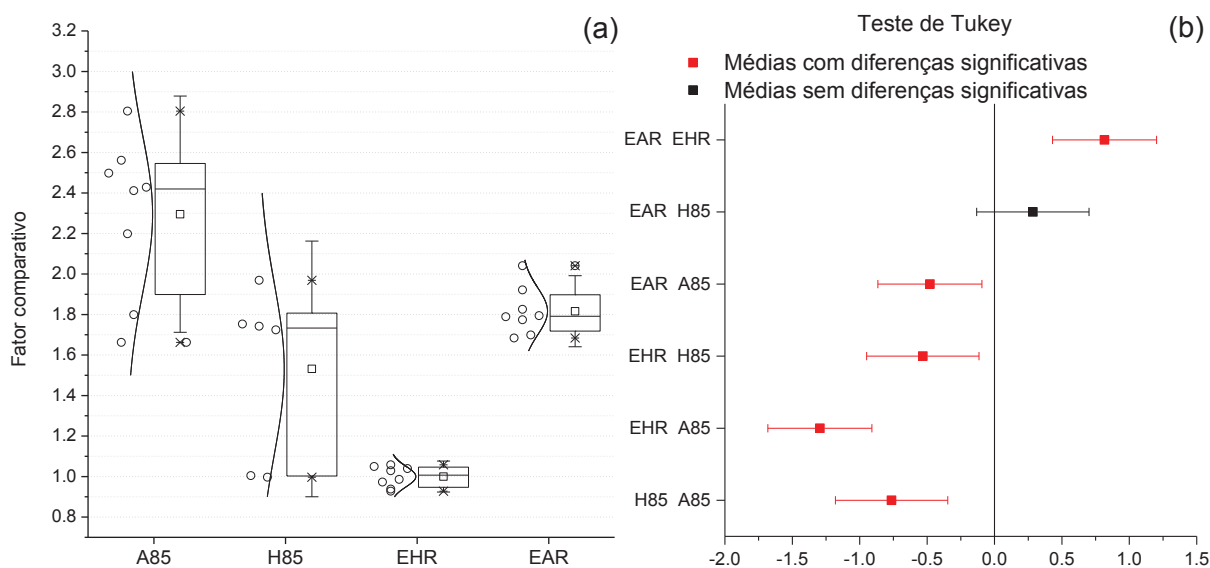
FIGURA 136 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS FLEX FUEL (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

Para os veículos leves de passageiros dedicados a etanol, observou-se que os combustíveis alternativos testados apresentaram um pior desempenho para as emissões de CO quando comparados ao combustível de referência (EHR), conforme FIGURA 137.

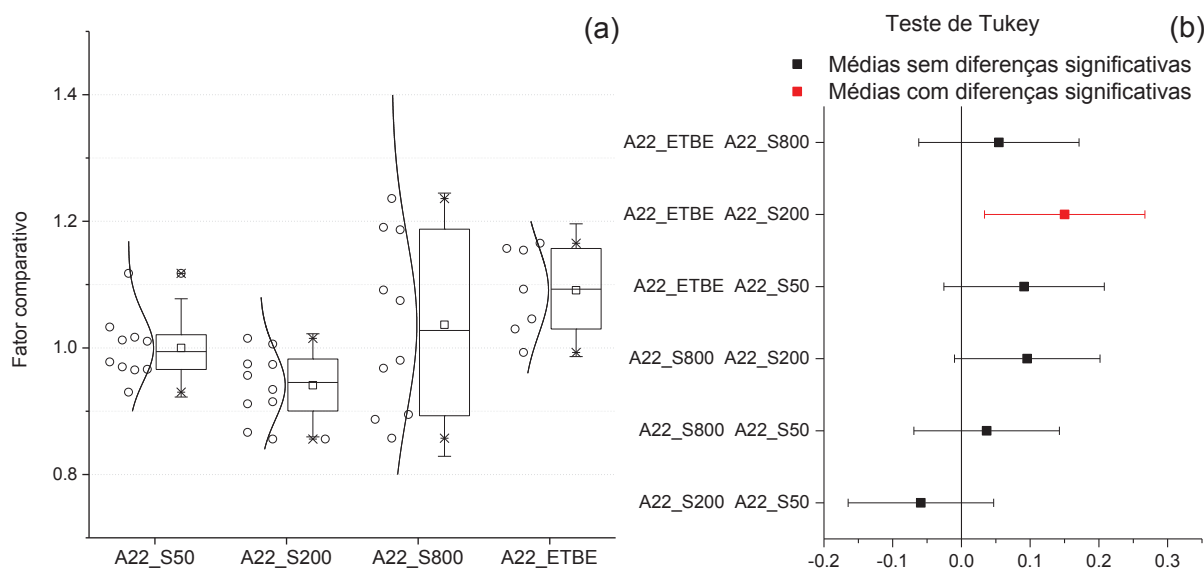
FIGURA 137 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

A FIGURA 138 apresenta o fator comparativo das emissões de NMHC para os veículos leves de passageiros do grupo V1. Observam-se diferenças estatísticas significativas apenas entre as emissões de A22-S200 e A22-ETBE.

FIGURA 138 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS (A) TESTE DE TUKEY (B)

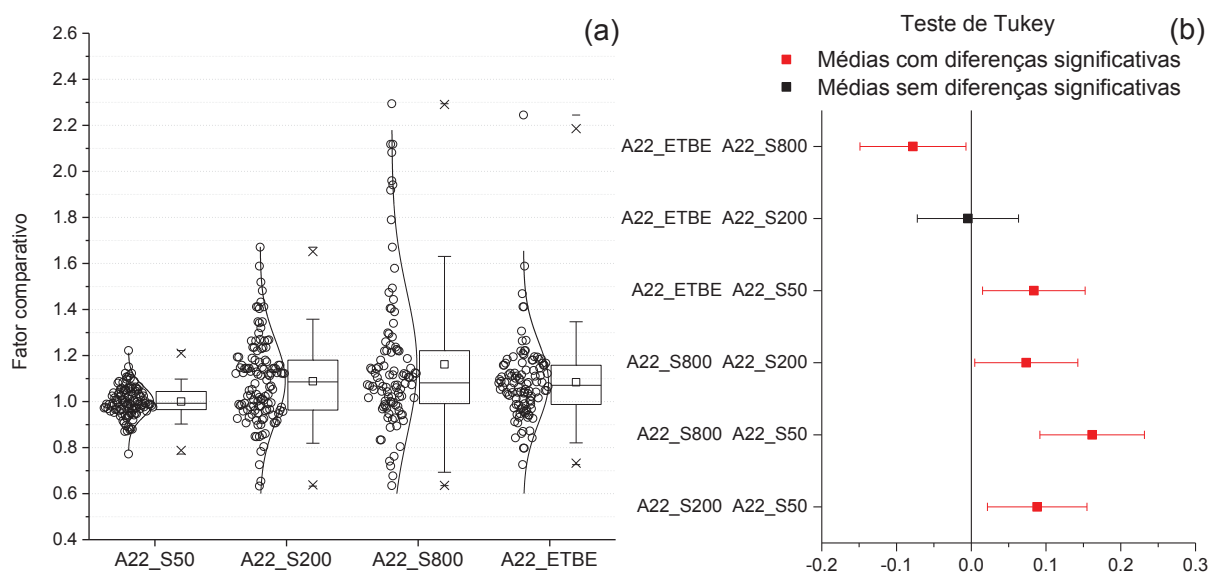


FONTE: O autor (2017).

Para os veículos leves de passageiros dedicados à gasolina as emissões de NMHC seguem a mesma tendência descrita para esse grupo nas emissões de CO e dos motocicletas para o CO e THC, ou seja, uma maior emissão do composto no combustível de maior teor de enxofre. Os resultados estão demonstrados na FIGURA 139.

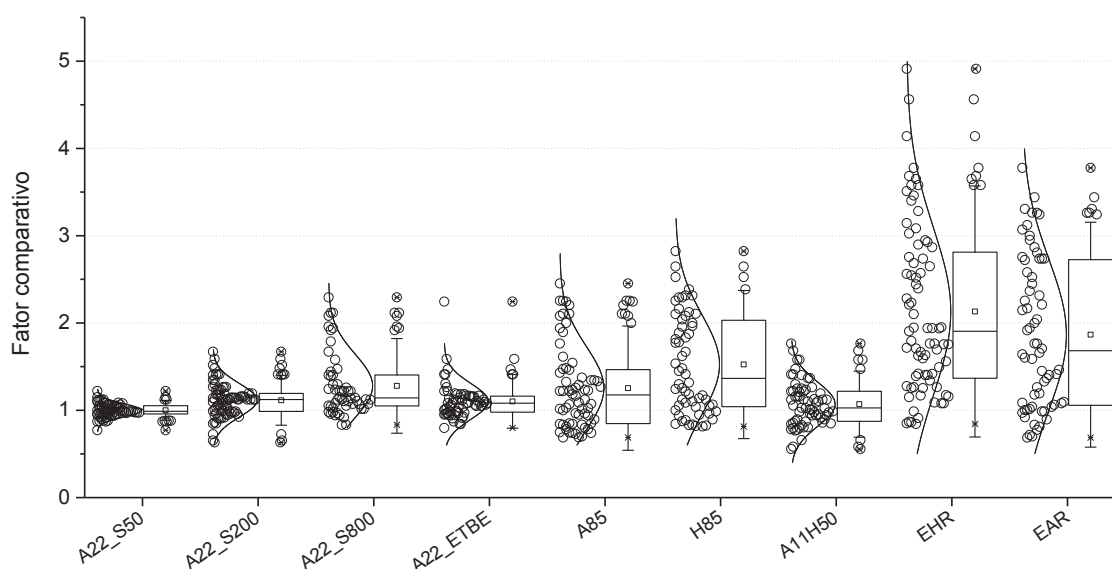
Na figura FIGURA 140 são apresentados os resultados para os veículos de leves de passageiros do grupo V2 com sistema de injeção flex fuel. Observa-se uma maior emissão de NMHC com aumento do teor de etanol, visto que nessas emissões estão computados os valores das emissões de álcool não queimado. O combustível de referência (A22-S50) apresentou a menor taxa média de emissões e a maior taxa média foi para o uso de EHR, superando o combustível de referência em mais de 100%. A emissão de EHR não apresenta diferença significativa apenas quando comparada ao combustível EAR. O combustível de referência apresentou diferenças significativas quando comparado aos combustíveis H85, EHR e EAR.

FIGURA 139 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 140 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC EM VEÍCULOS FLEX (A) TESTE DE TUKEY (B)

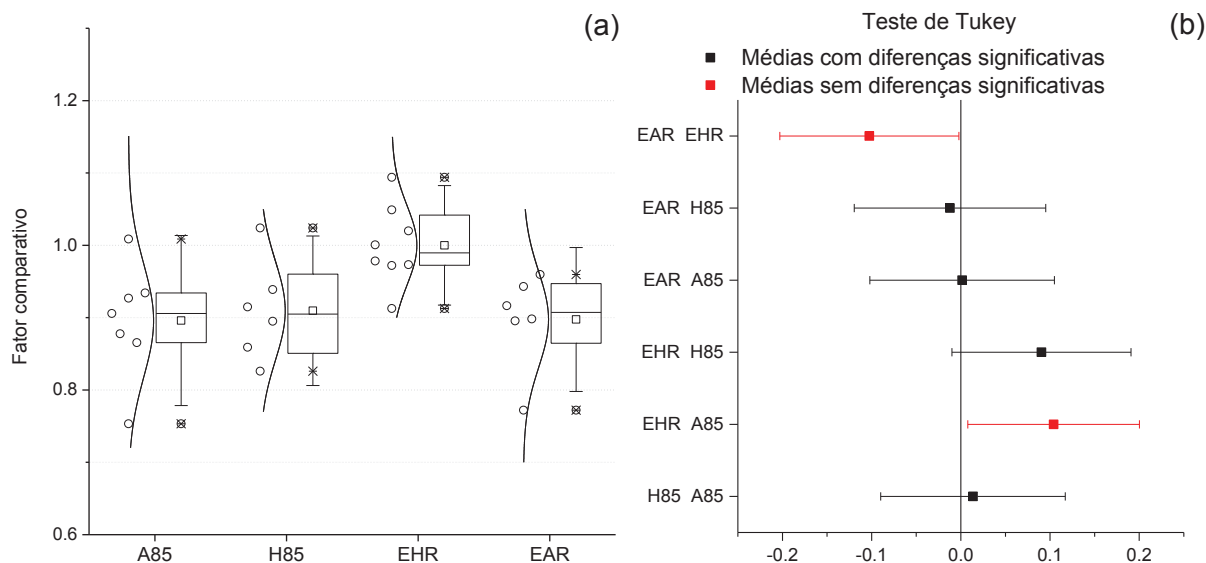


FONTE: O autor (2017).

Para os veículos dedicados à etanol, FIGURA 141, o uso de combustíveis alternativos ao EHR apresentou uma tendência de redução nas emissões de NMHC.



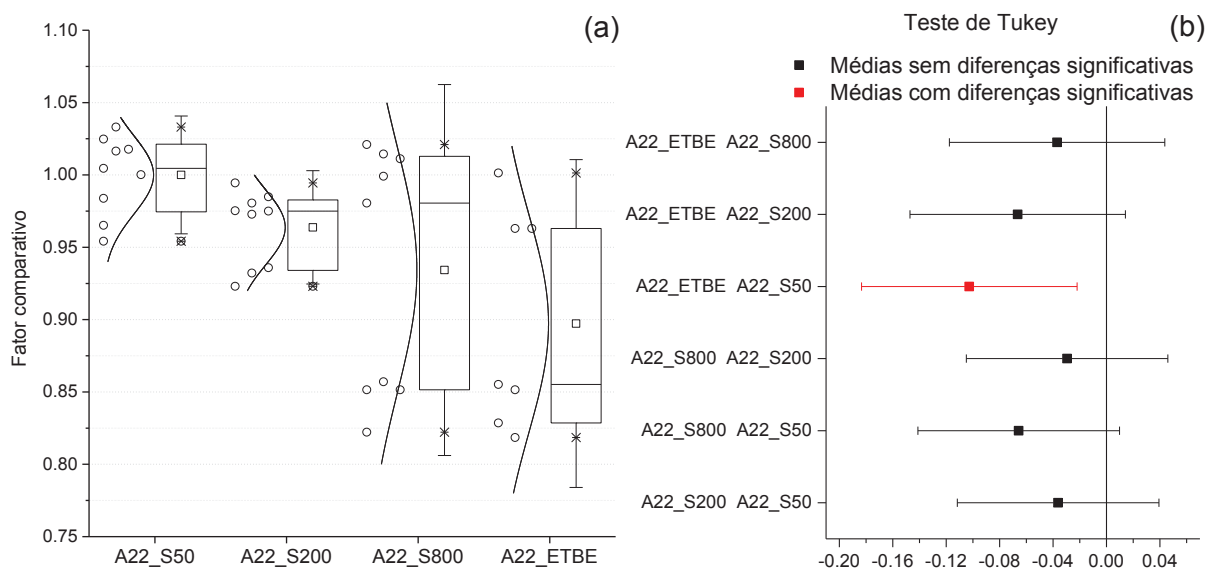
FIGURA 141 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NMHC EM VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

Para os veículos leves de passageiros do grupo V1, no tocante a emissões de NO<sub>x</sub>, os resultados com diferentes gasolinas são apresentados na FIGURA 142. Observa-se uma tendência de redução das emissões dos combustíveis quando comparados a gasolina A22-S50, com diferenças estatísticas significativas apenas para quando comparada com a gasolina A22-ETBE.

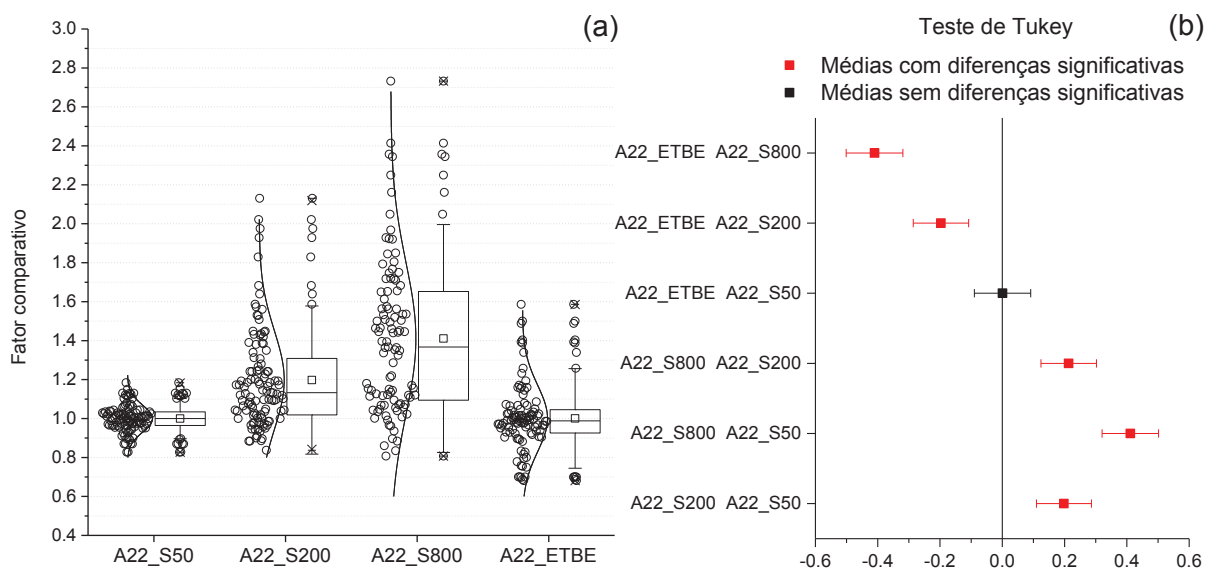
FIGURA 142 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

Os resultados das emissões de NO<sub>x</sub> para os veículos leves do grupo V2, movidos a gasolina, são apresentados na FIGURA 143. Como comentado anteriormente, o aumento do teor de enxofre colabora com o aumento nas emissões do composto. Apenas os combustíveis A22-S50 e A22-ETBE são considerados sem diferenças estatísticas entre si.

FIGURA 143 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES GASOLINAS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)

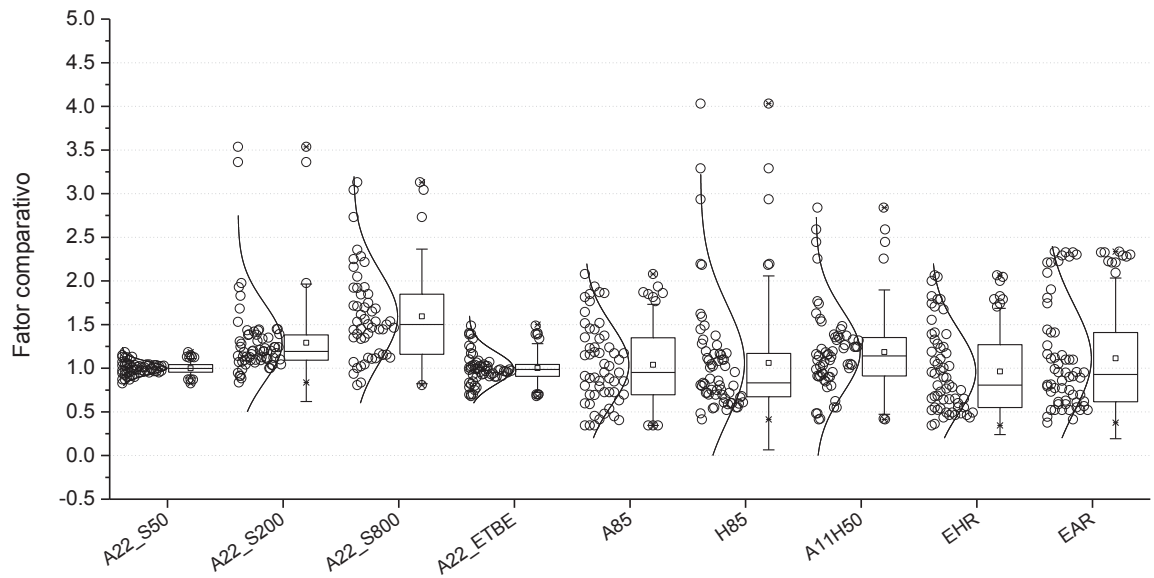


FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 144 observamos as emissões de NO<sub>x</sub> para os veículos flex fuel, sendo que a adição de etanol não corroborou para mudanças significativas dessas emissões. A gasolina A22-S800 foi o combustível que apresentou maiores emissões, sendo considerado com diferenças estatísticas quando comparada com os combustíveis: EAR, EHR, A11H50, H85, A85, A22-ETBE, A22-S200, A22-S50. O menor fator de emissão ocorreu com o combustível EHR, considerado com diferenças estatísticas quando comparado aos combustíveis: A22-S800, A11-H50 e A22-S200.

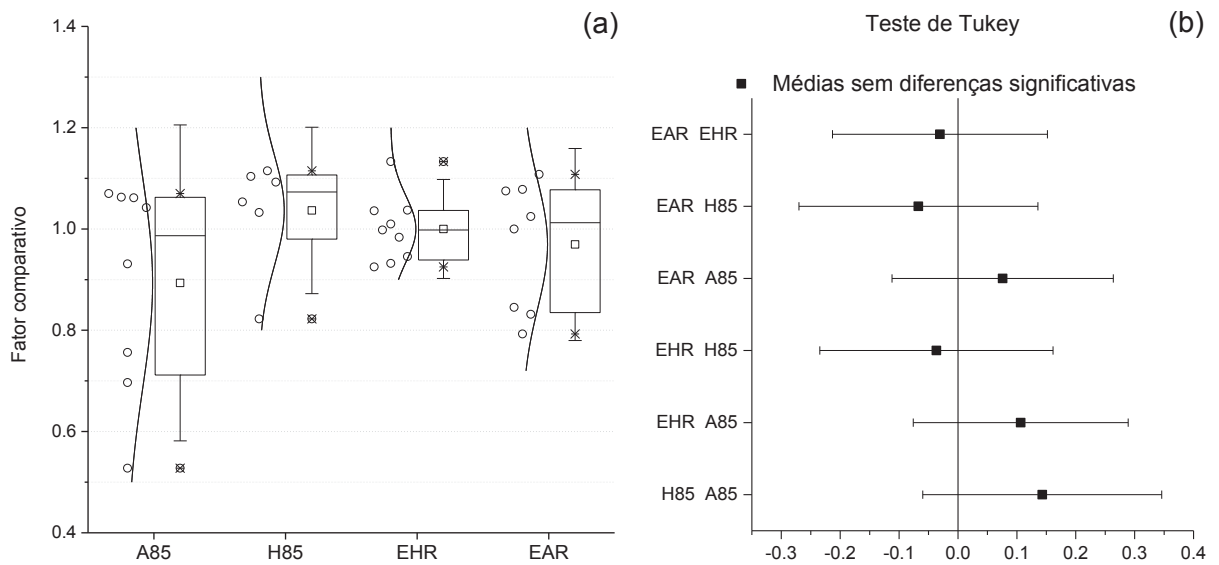
Para os veículos dedicados a etanol, conforme FIGURA 145, não foram observadas mudanças significativas nas emissões de NO<sub>x</sub> com o uso dos combustíveis alternativos empregados na pesquisa.

FIGURA 144 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS FLEX (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 145 – COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE NO<sub>x</sub> COM DIFERENTES COMBUSTÍVEIS – VEÍCULOS LEVES (A) TESTE DE TUKEY (B)



FONTE: O autor (2017).

## ANEXO 1 – INFORMAÇÕES DO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES

TABELA 62 – VALORES ESTIMADOS DE INTENSIDADE DE USO DA FROTA, EM Km ANO<sup>-1</sup>

Anos de uso	Automóveis e Comerciais leves Otto	Comerciais leves Diesel	Motociclos	ônibus Urbanos e micro-ônibus	Ônibus rodoviários	Caminhões semileves e leves	Caminhões médios	Caminhões semi-pesados e pesados
0	10.000	10.000	6.000	45.997	59.047	32.290	56.155	58.952
1	19.400	19.600	11.600	88.443	116.095	63.875	110.518	116.415
2	18.800	19.200	11.200	84.892	114.098	63.171	108.727	114.927
3	18.200	18.800	10.800	81.341	112.100	62.466	106.936	113.438
4	17.600	18.400	10.400	77.790	110.102	61.762	105.145	111.950
5	17.000	18.000	10.000	74.240	108.104	61.058	103.355	110.461
6	16.400	17.600	9.600	70.689	106.107	60.353	101.564	108.973
7	15.800	17.200	9.200	67.138	104.109	59.649	99.773	107.484
8	15.200	16.800	8.800	63.587	102.111	58.944	97.982	105.996
9	14.600	16.400	8.400	60.036	100.113	58.240	96.191	104.507
10	14.000	16.000	8.000	56.485	98.116	57.535	94.400	103.019
11	13.400	15.600	7.600	52.935	96.118	56.831	92.609	101.530
12	12.800	15.200	7.200	49.384	94.120	56.127	90.818	100.041
13	12.200	14.800	6.800	45.833	92.122	55.422	89.027	98.553
14	11.600	14.400	6.400	42.282	90.125	54.718	87.236	97.064
15	11.000	14.000	6.000	38.731	88.127	54.013	85.446	95.576
16	10.400	13.600	5.600	35.180	86.129	53.309	83.655	94.087
17	9.800	13.200	5.200	31.630	84.132	52.605	81.864	92.599
18	9.200	12.800	4.800	28.079	82.134	51.900	80.073	91.110
19	8.600	12.400	4.400	24.528	80.136	51.196	78.282	89.622
20	8.000	12.000	4.000	20.977	78.138	50.491	76.491	88.133
21	7.400	11.600	3.600	17.426	76.141	49.787	74.700	86.644
22	6.800	11.200	3.200	13.875	74.143	49.083	72.909	85.156
23	6.200	10.800	2.800	10.324	72.145	48.378	71.118	83.667
24	5.600	10.400	2.400	6.774	70.147	47.674	69.327	82.179
25	5.000	10.000	2.000	3.223	68.150	46.969	67.537	80.690
26	4.400	10.000	2.000	-	66.152	46.265	65.746	79.202
27	3.800	10.000	2.000	-	64.154	45.560	63.955	77.713
28	3.200	10.000	2.000	-	62.156	44.856	62.164	76.225
29	2.600	10.000	2.000	-	60.159	44.152	60.373	74.736
30	2.000	10.000	2.000	-	58.161	43.447	58.582	73.248
31	2.000	10.000	2.000	-	56.163	42.743	56.791	71.759
32	2.000	10.000	2.000	-	54.166	42.038	55.000	70.270
33	2.000	10.000	2.000	-	52.168	41.334	53.209	68.782
34	2.000	10.000	2.000	-	50.170	40.630	51.418	67.293
35	2.000	10.000	2.000	-	48.172	39.925	49.628	65.805
36	2.000	10.000	2.000	-	46.175	39.221	47.837	64.316
37	2.000	10.000	2.000	-	44.177	38.516	46.046	62.828
38	2.000	10.000	2.000	-	42.179	37.812	44.255	61.339
39	2.000	10.000	2.000	-	40.181	37.107	42.464	59.851
40	2.000	10.000	2.000	-	38.184	36.403	40.673	58.362
41	2.000	10.000	2.000	-	36.186	35.699	38.882	56.873
42	2.000	10.000	2.000	-	34.188	34.994	37.091	55.385
43	2.000	10.000	2.000	-	32.190	34.290	35.300	53.896
44	2.000	10.000	2.000	-	30.193	33.585	33.509	52.408
45	2.000	10.000	2.000	-	28.195	32.881	31.719	50.919
46	2.000	10.000	2.000	-	26.197	32.177	29.928	49.431
47	2.000	10.000	2.000	-	24.200	31.472	28.137	47.942
48	2.000	10.000	2.000	-	22.202	30.768	26.346	46.454
49	2.000	10.000	2.000	-	20.204	30.063	24.555	44.965
50	2.000	10.000	2.000	-	18.206	29.359	22.764	43.477

FONTE: MMA (2014)

TABELA 63 – FATORES DE CORREÇÃO DA INTENSIDADE DE USO DA FROTA DE ACORDO COM VENDAS DE COMBUSTÍVEIS

Ano-calendário	Gasolina C	Etanol hidratado	Diesel
1970	258%	0%	114%
1971	236%	0%	111%
1972	223%	0%	112%
1973	216%	0%	116%
1974	186%	0%	110%
1975	163%	0%	109%
1976	143%	0%	109%
1977	123%	0%	101%
1978	121%	0%	98%
1979	113%	366%	92%
1980	93%	124%	86%
1981	81%	163%	79%
1982	84%	125%	77%
1983	76%	126%	73%
1984	74%	125%	75%
1985	78%	123%	76%
1986	96%	133%	86%
1987	92%	120%	87%
1988	96%	119%	86%
1989	111%	127%	88%
1990	125%	117%	88%
1991	141%	122%	90%
1992	150%	114%	91%
1993	156%	119%	93%
1994	161%	123%	95%
1995	162%	133%	98%
1996	164%	142%	100%
1997	160%	132%	104%
1998	150%	136%	107%
1999	136%	138%	107%
2000	123%	119%	109%
2001	115%	105%	109%
2002	110%	118%	111%
2003	109%	111%	105%
2004	109%	134%	109%
2005	109%	119%	105%
2006	104%	105%	103%
2007	108%	108%	105%
2008	111%	112%	105%
2009	105%	105%	98%
2010	107%	108%	102%
2011	106%	107%	99%
2012	106%	107%	98%
2013	106%	107%	100%
2014	108%	109%	96%
2015	106%	107%	90%

FONTE: Dados fornecidos pelo IEMA: Instituto de Energia e Meio Ambiente.

TABELA 64 – ESTIMATIVA DO USO DE GASOLINA E ETANOL EM VEÍCULOS *FLEX FUEL*

Ano-calendário	Gasolina C	Etanol hidratado
2003	50%	50%
2004	0%	100%
2005	0%	100%
2006	10%	91%
2007	16%	84%
2008	20%	81%
2009	30%	71%
2010	48%	52%
2011	68%	32%
2012	75%	25%
2013	74%	26%
2014	75%	25%
2015	68%	33%

FONTE: MMA (2014) e dados fornecidos pelo IEMA: Instituto de Energia e Meio Ambiente.